

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



ESCUELA DE DOCTORADO DE LA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL

TESIS DOCTORAL

**ESTUDIO Y DISEÑO DE UNA PANTALLA DINÁMICA DE
PROTECCIÓN CONTRA CAÍDA DE ROCAS EMPLEANDO
MODELOS DINÁMICOS EN SOFTWARE DE ELEMENTOS
FINITOS**

PhD THESIS

**STUDY AND DESIGN OF A FLEXIBLE ROCKFALL BARRIER
USING EXPLICIT DYNAMIC MODELS IN FEM SOFTWARE**

Presentada por: **LAURA CASTAÑÓN JANO**

Dirigida por: **Dra. ELENA BLANCO FERNÁNDEZ**

Dr. DANIEL CASTRO FRESNO

Santander

2019

Agradecimientos

La realización de esta tesis no habría sido posible sin la financiación de la empresa INCHALAM Bekaert.

Asimismo, ha sido esencial la colaboración mantenida en el desarrollo de ciertas tareas con los siguientes laboratorios y entidades:

- LADICIM (Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales)
- LAGUC (Laboratorio de Geosintéticos de la Universidad de Cantabria)
- GiaDe (Grupo de Instrumentación y Análisis Dinámico de Estructuras de Obra Civil)
- Malla Talud Cantabria S.L

Quiero agradecer a mis directores, Dani y Elena, la confianza depositada en mí durante este tiempo.

También deseo mostrar mi gratitud a Juanjo y Mar, del grupo GICONSIMÉ de la Universidad de Oviedo, tanto por sus valiosos consejos como por el aliento que me han brindado.

A título personal, me gustaría dar las gracias a mis padres por su incesante y gran apoyo; y a Sergio, por su bendita paciencia.

Acknowledgements

This doctoral thesis would not have been possible but by the generous funding by the company INCHALAM Bekaert.

Likewise, I want to mention the essential collaboration carried out when performing some of the tasks with the following labs and entities:

- LADICIM (Laboratory of the Materials Science and Engineering; Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales in Spanish)
- LAGUC (Laboratory of Geosynthetics of the University of Cantabria; Laboratorio de Geosintéticos de la Universidad de Cantabria in Spanish)
- GiaDe (Group of Instrumentation and Dynamic Analysis of Structures in Civil Works; Grupo de Instrumentación y Análisis Dinámico de Estructuras de Obra Civil in Spanish)
- Malla Talud Cantabria S.L.

I sincerely would like to thank my supervisors, Dani and Elena, for their trust during all this time.

I would also want to express my gratitude to Juanjo and Mar, from the Group GICONSIME of the University of Oviedo, both for the valuable advice and encouragement that they have provided me with.

Last but not least, I would personally like to thank my parents for their continued and unceasing support and to Sergio for his blessed patience.

Resumen

Esta tesis doctoral presenta el diseño de una nueva pantalla dinámica de baja-media energía mediante el estudio y desarrollo de cada uno de sus componentes separadamente y finalmente, el estudio de su comportamiento en conjunto.

Las pantallas dinámicas son estructuras metálicas flexibles cuyo objetivo es detener rocas o material desprendido de un talud, evitando que llegue a una zona concreta a proteger, como pueden ser poblaciones, vías férreas o carreteras. Estas estructuras son muy demandadas por su bajo coste y facilidad de instalación, y son capaces de proteger de impactos de muy amplio espectro en cuanto a energía se refiere. En este trabajo el objetivo es la optimización de material en cada componente por lo que la energía absorbida por unidad de masa es la variable principal a tener en cuenta.

El estudio y diseño ha sido realizado utilizando ensayos experimentales de componentes individuales, como disipadores de energía y cables, así como simulaciones numéricas empleando softwares de elementos finitos para cálculos dinámicos. Estos modelos, además de considerar los efectos inerciales, son óptimos para el tratamiento de no linealidades tales como la presencia de contactos, la plasticidad del material y la no linealidad geométrica (grandes desplazamientos).

La ausencia de regularidad en el comportamiento de los disipadores de energía ya existentes ha incentivado la creación de un nuevo diseño que elimina este problema, consiguiendo curvas carga-desplazamiento similares procedentes de ensayos de disipadores de idénticas dimensiones.

Mediante el Diseño de Experimentos (DoE) y simulaciones numéricas se evalúa la energía que las pantallas son capaces de absorber en función de distintos factores implementados al modelo, tales como las dimensiones (alto y ancho) de la membrana, el cosido de la red o la ubicación de los disipadores de energía, consiguiendo optimizar, por tanto, el diseño de la pantalla en su conjunto.

Tras el DoE, se han construido dos pantallas, una de 250 kJ y otra de 500 kJ, para su posterior ensayo experimental, siguiendo el procedimiento de la Guía ETAG027, que, aunque no es de obligado cumplimiento, es el documento más seguido por los constructores de pantallas en la actualidad.

Por último, se comparan los resultados experimentales con las simulaciones numéricas, y se proponen ideas que facilitan la instalación y mejoran el funcionamiento de la pantalla a comercializar.

Abstract

This thesis presents the design of a new flexible barrier for low-medium energy impacts. This aim is reached by the research and development of each component separately and, eventually, the study of the overall behaviour.

Flexible barriers are metallic structures that retain rocks or detached material from a slope preventing them from arriving to a specific zone to protect, such as towns, roads or railways. These structures are now highly demanded due to their low cost, easiness of installation and the high spectrum of energy impacts that they can resist. This work is focused on the optimization of material in each component, so the energy absorbed by mass unit is the main variable to be considered.

The study and design have been backed up by the performance of experimental tests of individual components like brakes and cables, as well as numerical simulation using finite element software in dynamic conditions. These models, besides considering inertial effects, are optimal to deal with the three non-linearities: contacts, plasticity of the material and geometric nonlinearity (large displacements).

The absence of regularity in the behaviour of existent brakes has encouraged the creation of a new design that completely eliminates this problem, reaching load-displacement curves with similar shape and values from tests of brakes of identical dimensions.

Using Design of Experiments (DoE) and numerical simulations the maximal energy the barriers can absorb is evaluated with different features, such as the dimensions of the membrane (length and height), the sewing distance of the membrane to the perimeter cables and the location of the brakes optimising in this way the design of the barrier as a whole.

After DoE, two flexible barriers have been built, one of 250 kJ and another of 500 kJ, to be dynamically tested, following the procedure recommended by ETAG027. This guideline is not compulsory -it is not a standard-; however, is the most followed document by barrier builders nowadays.

Finally, experimental tests and numerical simulations are compared, and new ideas are proposed that will help to improve the installation and the working performance of the barrier to be commercialized.

INDICE

| | | |
|----------|---|------------|
| 1 | PRESENTACIÓN DE LA TESIS..... | 1 |
| 1.1 | JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS | 3 |
| 1.2 | OBJETIVOS..... | 5 |
| 1.3 | ESTRUCTURA DE LA TESIS | 6 |
| 2 | ESTADO DEL ARTE..... | 9 |
| 2.1 | INTRODUCCIÓN..... | 9 |
| 2.2 | PARTES DE UNA PANTALLA DINÁMICA..... | 10 |
| 2.2.1 | <i>Zona de intercepción.....</i> | <i>10</i> |
| 2.2.2 | <i>Estructura de Soporte</i> | <i>14</i> |
| 2.2.3 | <i>Componentes de conexión.....</i> | <i>15</i> |
| 2.2.4 | <i>Placas base y piezas de conexión al terreno</i> | <i>20</i> |
| 2.3 | PANTALLAS DINÁMICAS EXISTENTES EN LA BIBLIOGRAFÍA | 20 |
| 2.4 | CARACTERIZACIÓN DE COMPONENTES | 25 |
| 2.4.1 | <i>Cables</i> | <i>25</i> |
| 2.4.2 | <i>Anillos</i> | <i>25</i> |
| 2.4.3 | <i>Alambres.....</i> | <i>26</i> |
| 2.4.4 | <i>Grapas y clips.....</i> | <i>27</i> |
| 2.4.5 | <i>Membranas flexibles.....</i> | <i>29</i> |
| 2.4.6 | <i>Frenos</i> | <i>31</i> |
| 2.5 | GUÍAS DE APTITUD PARA EL USO..... | 35 |
| 2.5.1 | <i>Obtención del marcado CE.....</i> | <i>36</i> |
| 2.5.2 | <i>Descripción de la ETAG 027</i> | <i>37</i> |
| 2.6 | INSTRUMENTACIÓN DE PANTALLAS DINÁMICAS | 39 |
| 2.6.1 | <i>Dispositivos de medida de fuerza en cables.....</i> | <i>39</i> |
| 2.6.2 | <i>Dispositivos para medida de desplazamientos y velocidades.....</i> | <i>40</i> |
| 2.6.3 | <i>Dispositivos de medida en los anclajes</i> | <i>41</i> |
| 2.7 | MODELOS NUMÉRICOS DE RESOLUCIÓN | 41 |
| 2.7.1 | <i>El método de los elementos discretos.....</i> | <i>41</i> |
| 2.7.2 | <i>Modelos desarrollados empleando elementos discretos.....</i> | <i>42</i> |
| 2.7.3 | <i>El método de los elementos finitos</i> | <i>46</i> |
| 2.7.4 | <i>Modelos desarrollados empleando elementos finitos</i> | <i>49</i> |
| 2.8 | METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE PANTALLAS DINÁMICAS..... | 53 |
| 2.9 | CONCLUSIONES Y DECISIONES INICIALES | 55 |
| 3 | ESTUDIO DE LAS MEMBRANAS | 61 |
| 3.1 | INTRODUCCIÓN..... | 61 |
| 3.2 | DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS ALTERNATIVAS | 65 |
| 3.3 | SIMULACIÓN NUMÉRICA Y CALIBRACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS..... | 68 |
| 3.3.1 | <i>Redes de cable triangulares.....</i> | <i>68</i> |
| 3.3.2 | <i>Malla de alambre MT15000</i> | <i>69</i> |
| 3.4 | ANÁLISIS DE UN PAÑO DE RED..... | 82 |
| 3.4.1 | <i>Distribución de tensiones.....</i> | <i>84</i> |
| 3.4.2 | <i>Influencia de la unión perimetral-malla en la energía máxima</i> | <i>87</i> |
| 3.5 | ANÁLISIS DE UNA PANTALLA COMPLETA | 89 |
| 3.5.1 | <i>Calibración de dos pantallas dinámicas IBT150 e IBT500.....</i> | <i>89</i> |
| 3.5.2 | <i>Simulación de una pantalla con la membrana MT15000</i> | <i>107</i> |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4 | DISEÑO DE UN DISIPADOR DE ENERGÍA..... | 115 |
| 4.1 | CRITERIOS DE DISEÑO..... | 115 |
| 4.2 | NUEVO DISEÑO ESTUDIADO..... | 117 |
| 4.3 | PRIMERAS SIMULACIONES NUMÉRICAS | 119 |
| 4.4 | PROGRAMA DE ENSAYOS..... | 122 |
| 4.4.1 | <i>Ensayos dinámicos</i> | 123 |
| 4.4.2 | <i>Ensayos estáticos</i> | 129 |
| 4.5 | CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS A PARTIR DEL ENSAYO ESTÁTICO | 143 |
| 4.5.1 | <i>Cable del freno</i> | 143 |
| 4.5.2 | <i>Tubos metálicos</i> | 144 |
| 4.5.3 | <i>Resultados</i> | 146 |
| 4.6 | SELECCIÓN DE LA GEOMETRÍA FINAL | 147 |
| 5 | ANÁLISIS PARAMÉTRICO MEDIANTE DOE Y SELECCIÓN DE LAS DIMENSIONES..... | 151 |
| 5.1 | INTRODUCCIÓN..... | 151 |
| 5.2 | CREACIÓN DEL DOE..... | 152 |
| 5.2.1 | <i>Definición de Diseño de Experimentos (DoE)</i> | 152 |
| 5.2.2 | <i>Variables y factores del diseño factorial</i> | 152 |
| 5.2.3 | <i>Resultados</i> | 154 |
| 5.3 | DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS FINALES DE LA PANTALLA | 159 |
| 5.4 | SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA PANTALLA SELECCIONADA | 159 |
| 6 | DISEÑO DE LOS POSTES | 161 |
| 6.1 | CARGAS CONSIDERADAS | 161 |
| 6.2 | DISEÑOS CONSIDERADOS | 164 |
| 6.2.1 | <i>Versión 1: HEB</i> | 164 |
| 6.2.2 | <i>Versión 2: Circular I</i> | 168 |
| 6.2.3 | <i>Versión 3: Circular 2</i> | 172 |
| 6.3 | SELECCIÓN DEL DISEÑO PRELIMINAR Y MODELIZACIÓN DEL DEFINITIVO | 174 |
| 7 | DISEÑO DE LAS PLACAS DE ANCLAJE..... | 177 |
| 7.1 | CARGAS CONSIDERADAS | 177 |
| 7.2 | DISEÑOS CONSIDERADOS | 178 |
| 7.2.1 | <i>Versión 1</i> | 179 |
| 7.2.2 | <i>Versión 2</i> | 180 |
| 7.2.3 | <i>Versión 3</i> | 183 |
| 8 | CORROBORACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS MODELOS | 185 |
| 8.1 | INTRODUCCIÓN..... | 185 |
| 8.2 | DESCRIPCIÓN DE LAS PANTALLAS | 186 |
| 8.3 | INSTRUMENTACIÓN | 192 |
| 8.3.1 | <i>Pantalla de 250 kJ</i> | 192 |
| 8.3.2 | <i>Pantalla de 500 kJ</i> | 193 |
| 8.4 | LANZAMIENTOS Y BLOQUES EMPLEADOS | 194 |
| 8.4.1 | <i>Pantalla de 250 kJ</i> | 194 |
| 8.4.2 | <i>Pantalla de 500 kJ</i> | 194 |
| 8.5 | RESULTADOS..... | 195 |
| 8.5.1 | <i>Carga máxima en los cables</i> | 195 |
| 8.5.2 | <i>Altura residual en la red</i> | 197 |
| 8.5.3 | <i>Deformación máxima de la red</i> | 198 |
| 8.5.4 | <i>Análisis visual</i> | 199 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 8.5.5 | Comportamiento de los frenos | 202 |
| 9 | COMPARATIVA ENTRE LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS Y ENSAYOS IN SITU | 207 |
| 9.1 | INTRODUCCIÓN..... | 207 |
| 9.2 | COMPARACIÓN DE FUERZAS Y DESPLAZAMIENTOS RESPECTO AL MODELO NUMÉRICO CREADO..... | 209 |
| 10 | MEJORAS APLICABLES EN LA PANTALLA FINAL | 217 |
| 10.1 | INSTALACIÓN..... | 217 |
| 10.2 | FUNCIONAMIENTO | 219 |
| 11 | CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN | 223 |
| 12 | REFERENCIAS | 227 |
| | THESIS SUMMARY..... | 233 |
| 1 | THESIS INTRODUCTION | 235 |
| 2 | STATE OF THE ART..... | 237 |
| 3 | STUDY OF THE INTERCEPTION NETS..... | 242 |
| 4 | DESIGN OF ENERGY DISSIPATING DEVICE | 253 |
| 5 | PARAMETRIC ANALYSIS BY DOE AND DIMENSIONS SELECTION | 259 |
| 6 | DESIGN OF THE POSTS AND ANCHOR PLATES..... | 262 |
| 7 | CORROBORATION OF THE MODELS | 268 |
| 8 | FITTING OF THE FEM MODEL..... | 271 |
| 9 | IMPROVEMENTS APPLIED TO THE FINAL BARRIER | 275 |
| 10 | CONCLUSIONS AND FUTURE LINES OF RESEARCH | 276 |

ANEXO I. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DINÁMICOS DE LOS FRENOS

ANEXO II. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A LAS PANTALLAS DE 250 Y 500 KJ.

ANEXO III. ENSAYOS DE TRACCIÓN A LOS CABLES

ANEXO IV. PLANOS DE LA PANTALLA FINAL.

1 Presentación de la tesis

Los desprendimientos de rocas en taludes inestables son peligrosos si se encuentran en cercanías de una población o carretera. Por ello se buscan constantemente alternativas para contener, controlar o reducir la velocidad de estos bloques, que pueden llegar a tener dimensiones considerablemente grandes (Volkwein et al., 2011b, Chen et al., 2013).

La protección de zonas con riesgo de desprendimientos se suele realizar a través de sistemas flexibles. Un sistema de protección se denomina flexible cuando trabaja permitiendo una cierta movilidad o desplazamiento de forma que la estructura acompaña a la roca desprendida mientras reduce su energía cinética, y se permite la deformación de algunos de sus componentes. Esta forma de funcionar permite aligerar la estructura frente a otros sistemas rígidos, como pueden ser los muros o los falsos túneles, que suelen trabajar por resistencia (rigidez) de sus componentes. A cambio del menor volumen y peso de la estructura, es necesaria una revisión periódica de estos sistemas y el reemplazo de los elementos deformados tras un impacto.

Los principales tipos de sistemas flexibles son las membranas flexibles ancladas, las pantallas antidetritos y las pantallas dinámicas. La implantación de una u otra solución depende del rango de energía que genera el desprendimiento, del volumen y tipo del material desprendido, y de la configuración del talud o zona a proteger.

Las membranas flexibles ancladas están formadas por una red de cables o malla de alambre paralela al terreno que se sujeta a este empleando bulones a los que se fija una placa de anclaje. La malla puede llevar cables de refuerzo formando generalmente un patrón cuadrado o romboidal. El objetivo de este sistema es evitar o reducir el deslizamiento de un suelo o la caída de una roca a la zona a proteger.

Por otra parte, las pantallas antidetritos están formadas por una membrana que forma un cierto ángulo con el terreno. Estas membranas disponen de cables horizontales en sus bordes superior e inferior, que se fijan al terreno empleando bulones en cada extremo de estos. Además, estos sistemas pueden llevar cables horizontales adicionales repartidos a lo largo de toda la altura de la pantalla y pueden llevar incorporados disipadores de energía. El objetivo principal de las pantallas

antidetritos es resistir la presión provocada por estos flujos de detritos mediante la deformación de sus distintos componentes. Las pantallas antidetritos sufren un "llenado" progresivo a medida que el flujo desciende por el canal o la colina.

Por último, las pantallas dinámicas son elementos que tienen una zona de impacto que de alguna manera transmite los esfuerzos al terreno (Volkwein et al, 2011a). Por definición el sistema es ligero y esbelto, sus materiales más utilizados son las redes de cables con diversas formas. Están formadas por una red de intercepción, que recibe el impacto de las rocas, postes que se encargan de mantener la red en posición extendida y cables perimetrales y tirantes que se encargan de transmitir las cargas desde la zona de impacto hacia el terreno. Los cables perimetrales y tirantes pueden llevar incorporados elementos disipadores de energía.

Se puede mencionar que el inicio a nivel mundial de la utilización de pantallas de contención se produce en Suiza en 1951 en la empresa Brugg Cable Products. Posteriormente, en 1960 la compañía francesa The Industrial Enterprise desarrolló un sistema de retención de caída de rocas. En 1990 Sisyphé Nova Ingeco (franco-española) presenta sus productos con una innovada concepción de los sistemas. Desde los noventa hasta estos días han surgido varias empresas, entre las más importantes se encuentran Geobrugg, Maccaferri, Paramassi y MallaTalud Cantabria (MTC), que se han dedicado a desarrollar nuevas pantallas dinámicas y tratar de mejorar su funcionamiento para aumentar su capacidad de retención de rocas.

Cuatro son los motivos principales que hacen de las pantallas dinámicas los sistemas flexibles más demandados en la actualidad:

- Cantidad reducida de material: en contraposición a las membranas flexibles, este tipo de protección no necesita cubrir la totalidad de la superficie a proteger. Mediante el análisis de trayectorias (en el que los parámetros más relevantes son la dirección de los bloques y la altura de los rebotes) se determina la localización de la pantalla, que adopta un ángulo entre 12 y -30 grados con respecto al terreno, y también la altura de la misma, que generalmente no supera los 8 metros.
- Bajo impacto visual: al tratarse de una estructura ligera y poco voluminosa se mezcla con la vegetación que crece alrededor de ella, haciéndola en muchos casos pasar desapercibida entre la naturaleza (Figura 1).
- Fácil instalación: la duración de instalación de una pantalla dinámica suele ser de uno a varios días, dependiendo de su longitud. La ventaja de estas estructuras es que pueden transportarse al lugar de instalación parcialmente montadas, minimizando el peligro que conlleva dicho montaje en una zona con peligro de caída de rocas como reduciendo el corte de vías de comunicación en caso de que la pantalla se instale desde la carretera.

- Amplio rango de disipación de energía: existen pantallas desde 100 kJ hasta 8000 kJ. Para energías superiores sería necesario recurrir a otros sistemas de protección de taludes.



Figura 1. Pantallas dinámicas entre la vegetación

En esta Tesis Doctoral se realiza una revisión de todas las pantallas flexibles (o dinámicas) existentes en el mercado y de las distintas alternativas para cada una de las partes que componen dichas estructuras. El objetivo final es el diseño de una pantalla de baja-media energía que sea capaz de competir con las ya existentes en el mercado optimizando materiales. Para ello se emplean programas basados en el Método de los Elementos Finitos (FEM). Finalmente, se realiza un ensayo de la pantalla diseñada bajo las recomendaciones de la guía europea indicada para pantallas dinámicas (EOTA).

1.1 Justificación de la tesis

El diseño de una pantalla dinámica requiere un proceso de selección progresivo de todos y cada uno de sus componentes, así como la ejecución de análisis de las distintas variables que pueden influir en su capacidad de retención de energía. El empleo de software de elementos finitos y elementos discretos para este fin resultan herramientas muy útiles, aún más cuando se trata de estructuras tan sumamente grandes como la que se pretende estudiar en este trabajo, cuyos ensayos experimentales suponen un desembolso muy elevado de dinero.

Aunque en la bibliografía sí aparecen análisis del comportamiento de pantallas dinámicas (Mentani et al., 2016b, Bertrand et al., 2012, Koo et al, 2016) y algunos casos en los que se trata la optimizaciones de componentes (Moon et al., 2014, Gentilini et al 2013), estas evaluaciones se realizan a partir de una pantalla de la que no se menciona cómo se ha procedido a su diseño, y a

la que se le realizan ensayos experimentales, al contrario de lo que se cree más conveniente, que es la realización de estos estudios por métodos numéricos en una fase previa a la comprobación del funcionamiento de la misma mediante ensayos a gran escala.

Los pocos procedimientos de diseño encontrados en la bibliografía se remontan al año 1995 con la tesis de Roberto Luis Fonseca y 2007 con la tesis de Luis López Quijada. En ambos se utilizan métodos analíticos y comportamientos estáticos para el cálculo de los esfuerzos y en consecuencia dimensionamiento de los componentes. Estos métodos, aunque fiables por ser de ente conservador, se consideran en la actualidad sobrepasados por otro tipo de metodologías, como puede ser la utilización de softwares de elementos finitos en la que se incluyen los efectos inerciales y por tanto se tienen en cuenta las variables dinámicas en el sistema. Luis López Quijada incluyó varios modelos de elementos finitos. Sin embargo, lo hizo de una forma muy básica, empleando simulaciones numéricas estáticas demasiado simplificadas que se utilizaron como método de comprobación de los cálculos analíticos. La unión de excesiva simplificación y formulación estática del problema aportó de nuevo resultados muy conservadores. Las simulaciones dinámicas realizadas en dicha tesis aportaron resultados muy diferentes a la realidad (hasta un 180% de diferencia) y por tanto solo se utilizó para obtener la secuencialidad de funcionamiento de los componentes, más que el dimensionamiento y diseño.

Otra metodología desarrollada en el trabajo de trabajo Xu et al. (2018) se basa en el diseño a partir del cálculo del porcentaje de energía absorbido por cada componente de la pantalla. Este autor sí utiliza software de elementos finitos con formulación dinámica. Sin embargo, se focaliza en una pantalla de referencia, cuyos componentes ya están determinados de antemano.

Adicionalmente, se encuentra la problemática de que algunos de los componentes de estas estructuras, a saber, los disipadores de energía, en ocasiones presentan comportamientos irregulares, en especial aquellos cuyo método de disipación principal es la fricción. En estos casos aparece la incertidumbre de no conocer con exactitud ni la carga a la cual el sistema comienza a funcionar; es decir, a producirse el deslizamiento, ni la cantidad de energía total capaz de absorber.

Este trabajo se engloba dentro de un proyecto que el grupo GITECO (Grupo de Investigación en Tecnología de la Construcción) de la Universidad de Cantabria desarrolla en colaboración con la empresa chilena INCHALAM, cuyo objetivo es conseguir crear una pantalla de baja-media energía con el fin último de competir con su principal competidor, la empresa GeoBrugg, reconocida a nivel mundial, y que hasta el momento tiene la mayor cuota de mercado en la instalación de pantallas dinámicas tanto en Chile como en prácticamente todo el mundo.

1.2 Objetivos

Los objetivos generales de la presente tesis son:

Objetivo general 1. El diseño de una pantalla dinámica de baja-media energía.

Objetivo general 2. Establecer un proceso de diseño para las pantallas dinámicas que optimice los materiales empleados para minimizar el coste de la misma. Para ello se propone el análisis de cada uno de los componentes y de la interacción entre ellos.

Para cumplir estos objetivos generales, se planean los siguientes objetivos específicos:

Objetivo específico 1. Revisión de las pantallas dinámicas comercializadas por otros fabricantes. Análisis de componentes y evaluación de la resistencia de cada uno de ellos por separado y en unión formando una pantalla dinámica completa.

Objetivo específico 2. Utilización de modelos numéricos de resolución capaces de enfrentarse a situaciones de impacto; es decir, altamente dinámicas y que combinan los 3 tipos de no-linealidades presentes en estos problemas: contactos con rozamiento, plasticidad de los materiales y grandes deformaciones y desplazamientos en la geometría.

Objetivo específico 3. Diseño de un disipador de energía, también denominado freno, cuyo principal mecanismo de disipación provoque una curva de comportamiento regular y que no dependa de la forma de instalación del operario o de agentes externos que dañen el sistema, tal y como ocurre en la mayor parte de disipadores trabajando por fricción.

Objetivo específico 4. Estudio de parámetros, principalmente geométricos que podrían influir en la capacidad de retención de energía de una misma pantalla (es decir, con los mismos componentes) y de los que no se dispone información hasta la fecha.

Objetivo específico 5. Análisis de la pantalla diseñada tras la ejecución de ensayos experimentales para, en conjunto con la empresa que realiza los ensayos y la empresa proveedora de la pantalla, conseguir mejoras en cuanto a transporte e instalación y solventar problemas que podrían surgir derivados de su funcionamiento.

Objetivo específico 5. Comprobación a través de los ensayos experimentales de que el método de diseño es adecuado y capaz de reproducir el comportamiento real.

1.3 Estructura de la tesis

De acuerdo a los objetivos específicos mencionados, la tesis se dividirá en los siguientes capítulos:

Capítulo 1. Presentación de la tesis. Se encuentra el marco en el que se alberga el proyecto, con sus componentes, sus objetivos y sus motivaciones.

Capítulo 2. Estado del arte. Se realiza una descripción de cada uno de los componentes que forman una pantalla dinámica, así como la caracterización de estos mediante distintos tipos de ensayos, tanto estáticos como dinámicos. También se describe la principal guía de seguimiento para la certificación de pantallas dinámicas, y se detallan los principales métodos numéricos de resolución encontrados en la bibliografía.

Capítulo 3. Estudio de las redes de intercepción. Se seleccionan dos redes de intercepción diferentes a las utilizadas hasta la actualidad en otras pantallas dinámicas, pudiendo una de ellas colocarse en dos posiciones perpendiculares, y se realiza un estudio de la capacidad energética de dichas redes en cuatro pasos. En primer lugar, se calibran los modelos de elementos finitos de las redes en base a los ensayos disponibles o referencias bibliográficas de otros autores. Seguidamente se estudia la distribución de tensiones y energía absorbida en un solo paño de red utilizando distintos tipos de enlaces entre las redes y los cables del contorno. A continuación, con la pretensión de analizar las redes en un contexto de pantalla completa, se realiza una calibración de dos pantallas dinámicas de las que se disponen resultados, y así determinar los coeficientes de rozamiento y evidenciar que los enlaces empleados entre componentes de la estructura son realistas. Estos modelos obtenidos se utilizarán como base para realizar modelos de pantalla completa incluyendo las redes de cable o malla de alambre que se pretenden estudiar, con el fin de realizar una comparativa de energías con las condiciones de contorno lo más realistas posibles.

Capítulo 4. Diseño de un nuevo disipador de energía. Se describe el proceso de creación de un freno, mediante el estudio de cada uno de sus componentes por separado y también en conjunto utilizando una combinación de análisis por elementos finitos y a través de ensayos estáticos y dinámicos en los laboratorios de la Universidad de Cantabria.

Capítulo 5. Análisis paramétrico mediante DoE y selección de las dimensiones. Se estudia la influencia de distintos factores que pueden hacer variar la energía que es capaz de absorber una pantalla dinámica. Se realiza un diseño factorial, cuya respuesta se determina mediante modelos de elementos finitos de la pantalla completa con las características dadas por los factores. Adicionalmente los modelos ofrecen información sobre si existen puntos críticos en los diseños y ayudarán a determinar las características finales de la pantalla “a certificar”.

Capítulo 6. Diseño de postes. Se proponen 3 diseños de poste que se simulan numéricamente para comprobar su integridad estructural. Las cargas aplicadas a los tres postes se extraen del instante de equilibrio dinámico en el modelo definitivo de pantalla dinámica completa.

Finalmente, se selecciona un diseño y se le aplican mejoras con el objetivo de reducir su peso y facilitar el guiado de los vientos superiores.

Capítulo 7. Diseño de placas de anclaje. El proceso de diseño es similar al de los postes. Se simulan numéricamente 3 placas de anclaje aplicando las cargas extraídas del mismo modelo de pantalla. Finalmente, se selecciona el más adecuado en base a criterios de resistencia y funcionalidad.

Capítulo 8. Corroboración experimental de los modelos. Dos modelos de pantallas fueron ensayados experimentalmente siguiendo las especificaciones de la guía ETAG 027. La primera de las pantallas objeto de ensayo fue impactada con un nivel de energía máximo del 50% respecto al valor calculado en los modelos numéricos. Los resultados de esta permitieron realizar pequeñas modificaciones para asegurar que la 2ª pantalla ensayada fuese capaz de parar un bloque con una energía máxima igual a la calculada en el capítulo 5.

Capítulo 9. Comparativa entre las simulaciones numéricas y ensayos in situ. Se comparan los registros de fuerza versus tiempo y las elongaciones máximas de las simulaciones numéricas y de los ensayos experimentales. También se propone un modelo numérico mejorado que aporta una mayor concordancia con los ensayos de campo.

Capítulo 10. Mejoras aplicables a la pantalla final. Tanto el análisis DoE como los ensayos experimentales aportaron ideas que podrían aportar mejoras en el comportamiento de la pantalla final, tanto en su proceso de instalación, como en el funcionamiento en el proceso de impacto de la roca. En este capítulo se detallan dichas mejoras.

Capítulo 11. Conclusiones y futuras líneas de investigación. Se exponen las conclusiones del proyecto y se describen futuras líneas surgidas a partir de la ejecución de este trabajo y que podrían dar lugar a nuevos estudios relacionados con los sistemas de protección de taludes.

2 Estado del arte

2.1 Introducción

Las pantallas dinámicas, también llamadas pantallas flexibles son una solución a la caída de rocas en taludes inestables o susceptibles de desprendimientos. La retención de las rocas se consigue mediante absorción de la energía cinética que adquieren estas en su descenso por el talud desde el punto del desprendimiento y convirtiéndola en energía de deformación y desplazamiento de los componentes de la pantalla. La concepción inicial que se tenía para una estructura capaz de retener un bloque se basaba en la rigidez y resistencia de los componentes de esta. Sin embargo, esta idea evolucionó, pasando de la creación y diseño de pantallas rígidas con mayor volumen de material a pantallas flexibles en las que prima la deformación y el desplazamiento de sus componentes acompañando a la roca impactada durante un corto periodo de tiempo reduciendo así su velocidad progresivamente y dando lugar a cargas más bajas (siguiendo la ley de la cantidad de movimiento). Este cambio de concepto aligera las estructuras de protección, pero también hace necesaria una revisión periódica de los sistemas instalados para su posible sustitución en caso de grandes impactos o limpieza en casos de impactos de pequeñas rocas sin efecto alguno en la capacidad disipativa de la misma.

En este apartado se describen detalladamente las partes de las que está compuesta una pantalla dinámica, así como los ensayos tanto estáticos como dinámicos que se suelen realizar a cada uno para la definición de su resistencia máxima y su comportamiento a lo largo del tiempo. Se describe también la principal guía que define el método de realización y certificación de las pantallas dinámicas. Una correcta instrumentación será esencial para el cumplimiento de dicha guía, por lo que se realiza una revisión de los sistemas de registro de fuerzas, elongaciones y otras magnitudes esenciales en los ensayos. Por último, se incluye una descripción sobre los dos métodos numéricos más importantes empleados en el estudio y diseño de estas estructuras por parte de otros autores, y se muestran las distintas metodologías de simulación para ambos casos.

2.2 Partes de una pantalla dinámica

Las pantallas dinámicas están formadas por una estructura de intercepción, una estructura de soporte y elementos de conexión (ETAG 027). Cada una de estas partes se subdivide en los diferentes elementos mostrados en la Figura 2. A continuación, se describe cada una de las partes detalladamente.

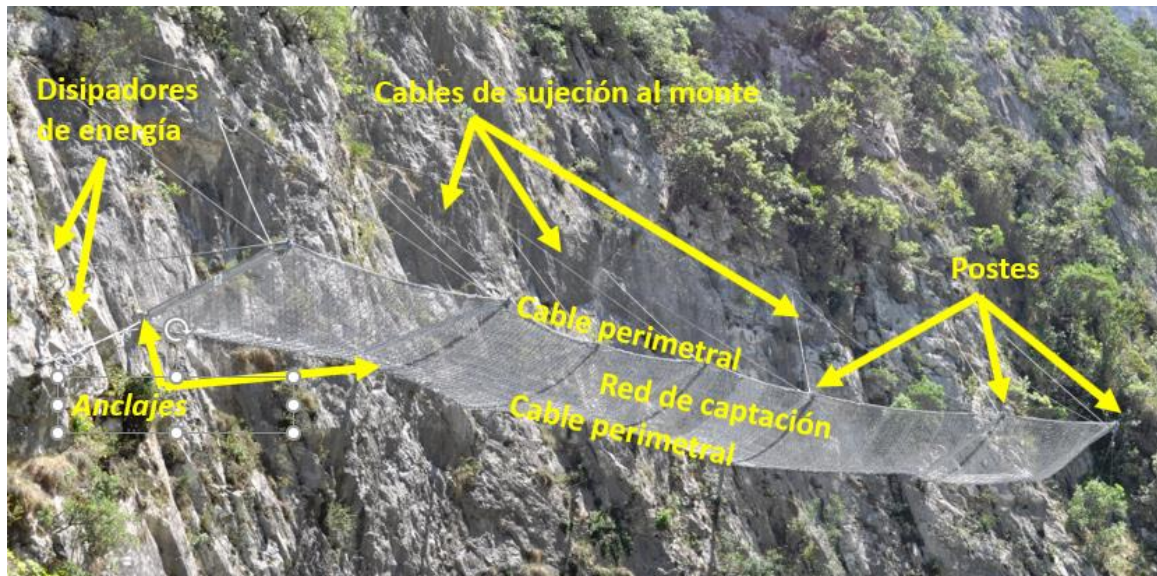


Figura 2. Partes principales de una pantalla dinámica

2.2.1 Zona de intercepción

La estructura de intercepción tiene como función soportar el impacto directo de la roca, deformándose elástica y/o plásticamente, y transmitiendo las tensiones al resto de elementos de la pantalla hasta la cimentación.

Generalmente consta de 2 capas superpuestas. La principal está formada por una red de cables metálicos entrelazados, malla de alambre o red de anillos, y es la que recibe y resiste las cargas y las transmite al resto de la pantalla. La secundaria, con una retícula más pequeña que la principal suele estar formada por mallas de alambre, cuyo objetivo principal es atrapar las masas más pequeñas evitando que caigan a la zona a proteger.

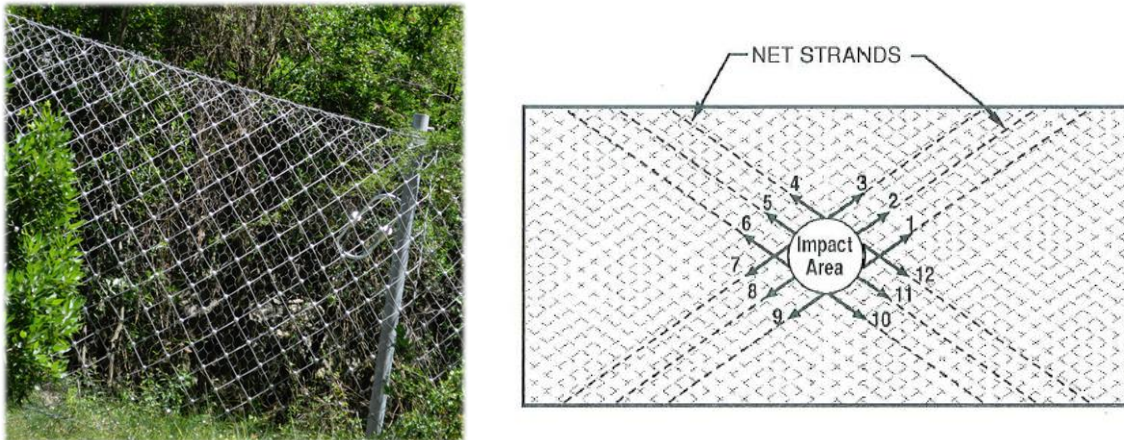


Figura 3. Red de cable de retícula cuadrada: a) geometría y b) distribución de las cargas desde la zona de impacto según Smith and Duffy 1990.

La red de cable cuadrada está formada por cables tejidos entre sí formando cuadrículas de idéntico tamaño. En cada intersección entre los cables, que corresponden a los vértices de cada cuadrícula, se coloca una pieza metálica llamada grapa, que fija la posición de los dos cables entre sí y restringe el desplazamiento evitando el deslizamiento entre ellos. La distribución de cargas en este tipo de red se produce en forma de cruz desde la zona de impacto hacia los cables perimetrales, tal y como se muestra en la Figura 3.

La red de anillos surge a partir de las redes empleadas para los submarinos (Peila et al., 1998). Esta red consiste en una serie de anillos entrelazados entre sí. Cada anillo individual suele estar formado por varias vueltas de alambre de alta resistencia, que se aseguran utilizando tres clips metálicos (Figura 4). Los anillos pueden estar dispuestos en dos configuraciones diferentes. En el primer caso cada anillo se conecta con 4 anillos adyacentes, mientras que en el segundo caso cada anillo se conecta con 6 anillos (Figura 5) (Gentilini et al., 2012). La ventaja que presenta este tipo de red reside en su alta deformabilidad, que se traduce en una alta capacidad de absorción de energía. Sin embargo, esta característica puede representar a su vez un inconveniente en tanto en cuanto la flecha que se genera en un impacto puede llegar a tener un valor bastante alto, por lo que la pantalla deberá estar situada a una mayor distancia de la zona a proteger respecto al mismo caso con redes de cable.

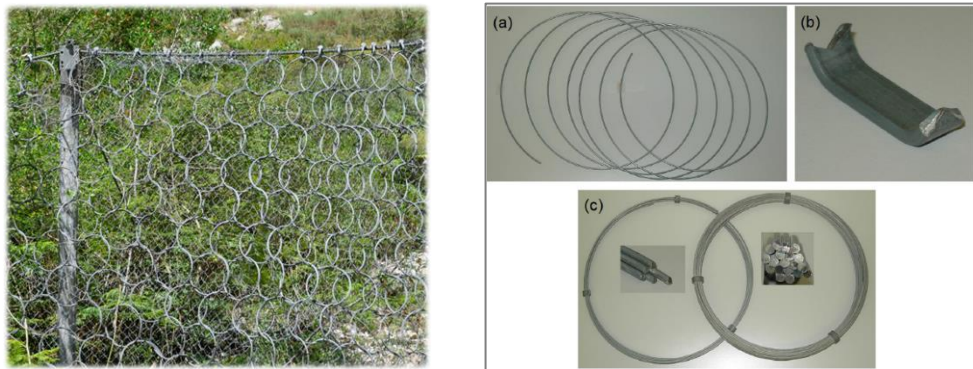


Figura 4. Red de anillos: a) geometría y b) componentes de un anillo según Escallón et al., 2014.

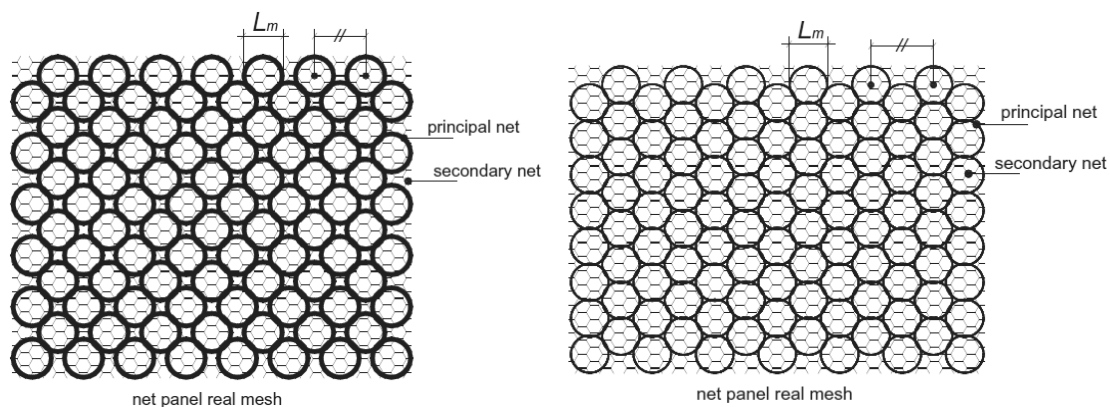


Figura 5. Configuraciones de una red de anillos: a) conexión con 4 anillos adyacentes, y b) conexión con 6 anillos adyacentes (Gentilini et al., 2012).

La red de cable GTS está formada por un cable al que se le proporciona forma de gota de agua (Trumer 2007) fijándose mediante el uso de clips. Cada cable ondulado con sus respectivos clips se entrelaza con el siguiente cable en la misma disposición, y así sucesivamente hasta conseguir un tamaño de paño de la longitud deseada. Los clips son elementos fusibles que se rompen y/o permiten el deslizamiento entre cables unidos entre sí por esta pieza prevaleciendo la integridad del cable. La geometría de esta red supone una deformación asimétrica de la misma, permitiendo una mayor deformación con menor esfuerzo en la dirección transversal (o vertical), y una menor deformación y mayores sollicitaciones en la dirección longitudinal

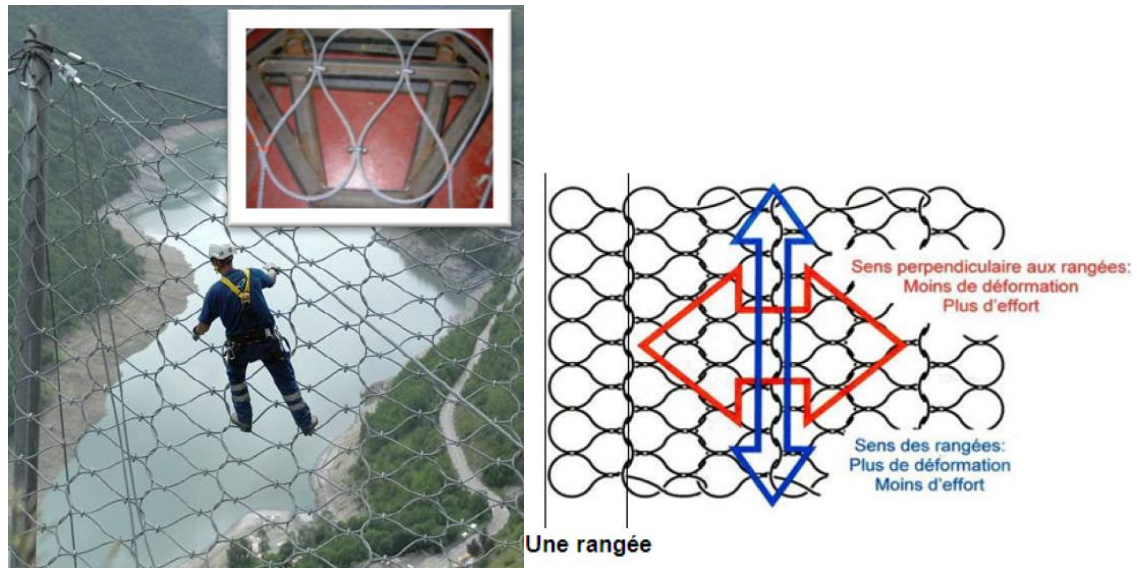


Figura 6. Red de cable G.T.S.: a) geometría, b) patrón de creación de la red por filas y distribución de las cargas y deformabilidad (Trad A. 2011).

Por último, la red Omega está formada por varios cables en forma serpenteante que se entrelazan entre sí para formar un patrón (Figura 7). A diferencia de la red G.T.S, esta red no dispone de clips de fijación, siendo el entrelazado el único método de generación del paño. Esto supone un importante ahorro, aunque presenta el gran inconveniente de adoptar una gran distorsión del patrón cuando ocurre un impacto.



Figura 7. Red de cable Omega

2.2.2 Estructura de Soporte

Para que la estructura de intercepción se mantenga erguida se emplean postes de diferentes materiales, geometrías y longitudes.



Figura 8. Postes actuando como estructura de soporte de la red de cables. Poste de perfil circular (izda.) y de perfil HEB (dcha.).

Entre los perfiles más empleados se encuentran los circulares y los perfiles en H, cuya diferencia fundamental reside en su resistencia a flexión y torsión. En el perfil circular la inercia se mantiene invariable cualquiera que sea la orientación de la carga. Perfiles abiertos, como los tipo H, poseen gran resistencia a flexión (elevado momento de inercia) en uno de sus ejes; sin embargo, esta se ve sensiblemente reducida cuando se rota 90°.

Por otra parte, el número y disposición de cables perimetrales y de las posiciones de los vientos laterales y superiores determina la geometría de la parte superior del poste, en la que se suelen incorporar placas soldadas u otros dispositivos más complejos adheridos al perfil.



Figura 9. Detalle de diferentes partes superiores de los postes.

2.2.3 Componentes de conexión

Forman parte de este grupo los cables de conexión, cables perimetrales, vientos laterales y superiores, disipadores de energía y sujetacables.

Todos estos elementos de la pantalla se encargan de transmitir las tensiones hacia las cimentaciones y/o mantener la estructura de intercepción en posición correcta.

- Cables o piezas de conexión

En este grupo se incluyen los elementos que mantienen unidos la red de intercepción y los cables perimetrales. Este propósito se consigue bien mediante el uso de cables de cosido, que se colocan en forma de espiral teniendo como eje central el cable perimetral y pasando a través de cada retícula del contorno de la red a sujetar (Figura 10a), o bien empleando grilletes, sobre todo para la sujeción de la red de anillos tal y como se muestra en la Figura 10b.

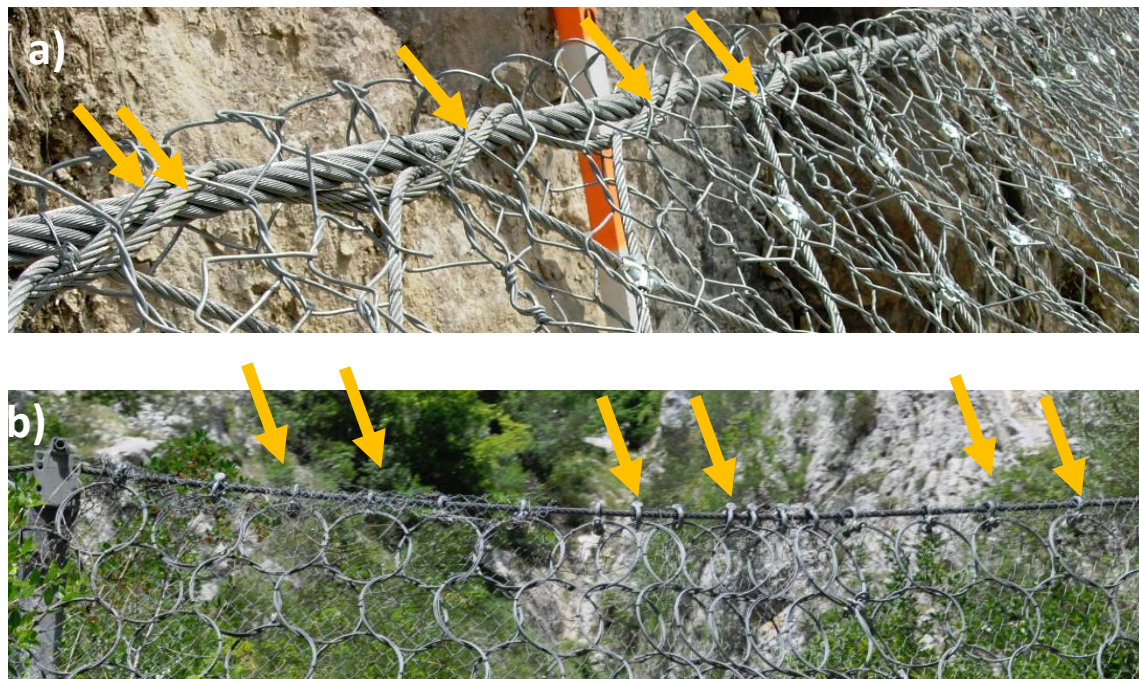


Figura 10. Conexión de la red de intercepción a los cables perimetrales mediante a) cables de cosido, y b) grilletes.

- Cables perimetrales

Los cables perimetrales se colocan en el contorno superior e inferior de la red de intercepción. Se unen a los postes mediante piezas o dispositivos adheridas a ellos (Figura 9) con la finalidad de mantener la red erguida y con la máxima área expuesta, y transmitir los esfuerzos provenientes de la red hacia los postes.

Las pantallas dinámicas de alta energía existentes en el mercado suelen disponer de varios cables perimetrales de cada lado de la red, permitiendo de esta manera una repartición de las cargas provenientes de la red de intercepción sobre un mayor número de cables.

- Cables de retención laterales y al monte (vientos laterales y superiores)

Los vientos laterales son la extensión de los cables perimetrales, desde que se termina la red de intercepción hasta su anclaje en el terreno. Generalmente se sitúan en el mismo plano de la pantalla.

Desde el momento en el que se liberan las restricciones de movimiento en la base de los postes permitiendo el giro de estos, es necesaria la instalación adicional de cables que mantengan los postes en la posición correcta. Estos cables reciben el nombre de vientos superiores, y reciben y transmiten al terreno las reacciones verticales de la fuerza generada por la caída de la roca.

En pantallas de alto nivel de energía, estos cables se acompañan de elementos disipadores de energía, que se detallan en el siguiente apartado.

- Disipadores de energía

Los disipadores de energía, también llamados frenos, son mecanismos que se incluyen en las pantallas dinámicas para absorber parte de la energía provocada por el impacto de las rocas sobre las mismas, ayudando a reducir tensiones en la estructura (Castanon-Jano et al., 2017). Estos dispositivos transforman la energía cinética y potencial de los materiales que impactan en energía de deformación, fractura o calor generada por fricción.

Los disipadores se pueden clasificar en 4 subgrupos en función de su mecanismo de disipación:

- ❖ Fricción pura: Estos fueron los primeros frenos en ser inventados debido a su simplicidad. Principalmente utilizan los cables como elemento principal del freno, que fricciona sobre unas mordazas o abrazaderas que disponen de uno o varios pernos de

fijación. El apriete de dichos tornillos determina el nivel de fricción entre los componentes y por tanto la energía de disipación del freno (Figura 11).

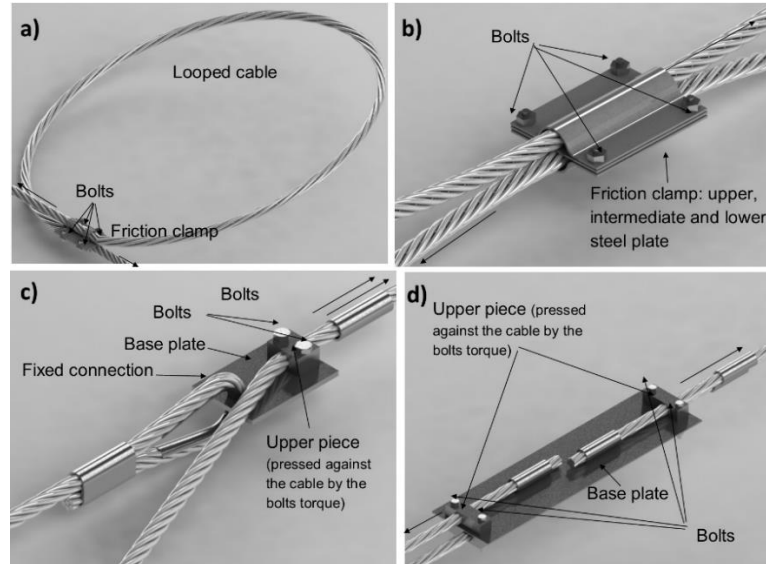


Figura 11. Frenos con mecanismo de disipación por fricción (Castanon-Jano et al., 2016)

- ❖ **Deformación plástica:** La absorción de energía en este grupo se basa en la deformación permanente sufrida por algunos de sus componentes cuando se supera el límite elástico del material del que está fabricado. En el freno que se muestra en la Figura 12 incluye una pieza metálica en forma de espiral conectada a los cables en cada uno de sus extremos. Cuando actúa la fuerza la espiral se estira deformándose permanentemente.



Figura 12. Freno con mecanismo de disipación por deformación plástica (Castanon-Jano et al., 2016)

- ❖ **Mixtos fricción/deformación plástica:** estos frenos mezclan los dos mecanismos de disipación anteriormente descritos. Tal y como se observa en la Figura 13, poseen componentes con geometrías muy diversas. El primer freno que se muestra (Figura 13a) está formado por un tubo por cuyo interior atraviesan 2 cables que se fijan en los extremos opuestos mediante 2 piezas que actúan como topes, de manera que, cuando se transmite la carga a través de los cables, los topes se deslizan por el interior del tubo a la vez que este se deforma expandiendo su diámetro. Los frenos de la Figura 13b y Figura 13c (del Coz et al., 2010) emplean la misma idea para la disipación de energía; uno o varios tubos de pequeño diámetro, por cuyo interior discurren los cables son fijados mediante uno o dos manguitos a los que se les aplica una determinada carga de apriete. Cuando la carga actúa sobre los cables ejerciendo tracción sobre ellos, se produce disipación de energía del freno debido al rozamiento entre los manguitos y los tubos y también debido a la deformación plástica de los tubos. Los frenos de la Figura 13 d y e se basan en la compresión por pandeo de uno o varios tubos de sección cuadrada o circular cuando 2 topes situados en ambos extremos comprimen los perfiles. Por último, los frenos de la Figura 13 f1 y f2 son los de más reciente invención, y consisten en una pletina o varias varillas de acero (generalmente dos) conectados al extremo de un cable, que se hacen pasar a través de un mandril conectado al extremo del otro cable, que obliga a que dichas piezas se curven 180 grados.

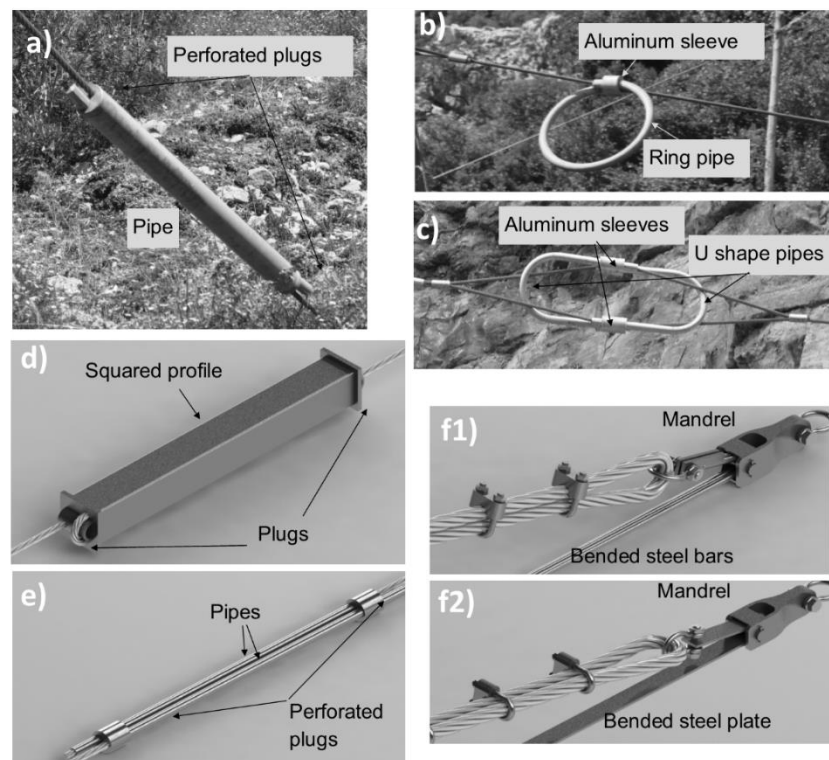


Figura 13. Frenos con mecanismo de disipación mixta fricción + deformación plástica (Castanon-Jano et al., 2016).

- ❖ Rotura parcial: los dispositivos incluidos en este grupo se aprovechan de la carga de rotura del material de las piezas que lo forman. En el primer caso (Figura 14a) se muestra un perfil cuadrado atravesado en su interior por dos cables en direcciones contrarias, y en cuyos extremos disponen de dos cuchillas, que cortan progresivamente el perfil metálico en el instante en el que se produce la carga de tracción sobre el freno. En el segundo caso (Figura 14b, Thomel, 1998) el freno se basa en la rotura escalonada de cables situados en paralelo y que poseen el mismo diámetro pero diferentes longitudes. El freno que se muestra en la Figura 14c está formado por una serie de discos metálicos apilados. El cable en el que se inscribe el freno se pliega, se hace pasar por el interior de los discos y se fija en el extremo contrario alrededor de una que actúa de eje. La tracción del cable producida por un impacto hace que los discos se deformen y se rompan secuencialmente. Por último, el freno que se observa en la Figura 14d está compuesto por un disco en forma de espiral en el que se mecanizan agujeros en forma de espiral. El funcionamiento se basa en la rotura progresiva del material que se encuentra entre los orificios perforados que forman una espiral, acompañado de la deformación plástica del resto del material, que tiende a desenrollarse respecto de su eje central.

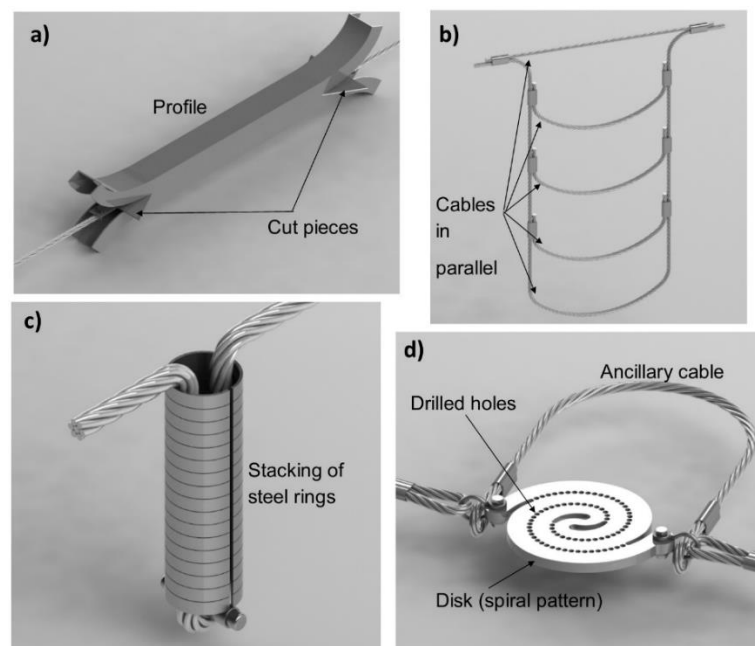


Figura 14. Frenos con mecanismo de disipación por rotura parcial (Castanon-Jano et al., 2016).

2.2.4 Placas base y piezas de conexión al terreno

Estos componentes tienen como objetivo la conexión de los postes con el terreno. No presentan una tendencia a una determinada geometría. Existen distintas fórmulas, que difieren en la necesidad o no de las placas de anclaje, la ubicación de las guías para los cables perimetrales, la restricción de movimiento creada sobre el poste, etc. En la Figura 15 se presentan 4 ejemplos con diferente número de bulones de anclaje (de 1 a 4 bulones). Este número varía en función de la capacidad energética de la pantalla. Se observa, sobre todo en los 3 primeros ejemplos, que la pieza que ha de conectar el poste con el terreno es mayor cuantos más puntos de anclaje posean. En el primer caso incluso se prescinde de la placa de anclaje al uso y se sustituye por una pieza de conexión que dispone de todos los útiles para conectar el poste y ejercer de guía de los cables perimetrales.

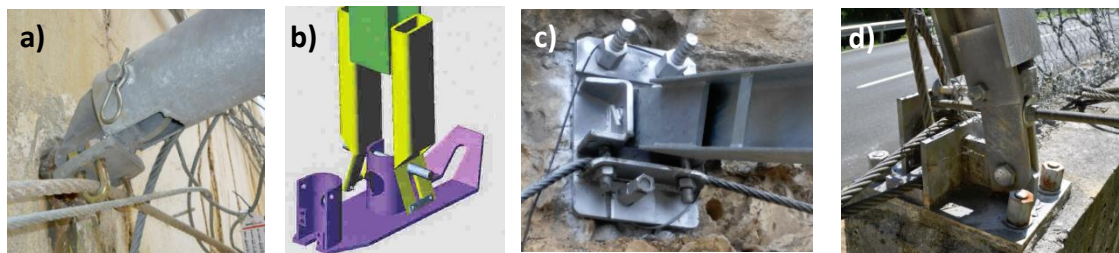


Figura 15. Placas de anclajes o piezas de conexión de diferentes fabricantes a) Mallatalud, b) Geobrugg y c) Mallatalud, y d) desconocido.

2.3 Pantallas dinámicas existentes en la bibliografía

A continuación, se incluyen los datos de las pantallas dinámicas que comercializan las empresas más representativas del sector a día de hoy. Estas son Maccaferri, Geobrugg, MallaTalud Cantabria (o MTC), TRUMER y Elite GTS, esta última teniendo una configuración de la estructura ligeramente diferente a las anteriores, pero manteniendo los mismos componentes.

Tabla 1. Características de las pantallas CTR de la compañía Maccaferri.

| | MACCAFERRI | | | | |
|------------------------|--|---|--|---|---|
| TIPO | CTR 05/07/B | CTR 10/04/B | CTR 20/04/B | CTR/30/04/A | CTR 50/07/A |
| Energy class | 500 | 1000 | 2000 | 3000 | 5000 |
| Red principal | Cuadrada 300x300 | Cuadrada 200x200 | Cuadrada 200x200 | Anillos Ø350 | Anillos Ø350 |
| Malla auxiliar | Hexagonal | Hexagonal | Hexagonal | Hexagonal | Hexagonal |
| Postes | Tubular \varnothing_{ext} 114,3 mm | HEA 160 | HEA 160 | HEA 200 | HEA 220 |
| Distancia entre postes | 10 m | 10 m | 10 m | 10 m | 10 m |
| Altura de la pantalla | 3 m | 3-5 m | 5 m | 5 m | 6 m |
| Nº perimetral inferior | 1 | 1 | 2 | 2 | 4 |
| Nº perimetral superior | 1 | 1 | 2 | 2 | 4 |
| Diámetro cables | | | | 20 mm | |
| Vientos superiores | 2/poste | 2/poste | 2/poste | 2/poste | 4/poste |
| Frenos | De doble tubo En los cables laterales | De doble tubo En los cables laterales y vientos superiores | De doble tubo En los cables laterales, vientos superiores y perimetral superior | De doble tubo En los cables laterales, vientos superiores y perimetral superior e inferior | De doble tubo En los cables laterales, vientos superiores y perimetral superior e inferior |

Tabla 2. Características de las pantallas GBE de la compañía GeoBrugg.

| | GEOBRUGG | | | | |
|-------------------------------------|--|--------------------|--|--------------------|---|
| TIPO | GBE-100A-R (sin vientos superiores) | GBE-500A | GBE-500A-R (sin vientos superiores) | GBE-1000A | GBE-1000A-R (sin vientos superiores) |
| Energy class | 100 | 500 | 500 | 1000 | 1000 |
| Red principal | TECCO G80/4 | TECCO G80/4 | TECCO G80/4 | TECCO G80/4 | TECCO G80/4 |
| Malla auxiliar | | | | | |
| Postes | Flanged profile | HEA 120 | HEA 140 | HEA 120 | HEA 180 |
| Distancia entre postes | 6-12 m | 6-12 m | 6-12 m | 6-12 m | 6-12 m |
| Altura de la pantalla | 2-4 m | 2-5 m | 2-4 m | 3-5 m | 3-5 m |
| Nº perimetral inferior | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Nº perimetral superior | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Diámetro cables | 12-14 mm | 14-18 mm | 14-18 mm | 14-20 mm | 14-20 mm |
| Vientos superiores | NO | 2/poste | NO | 2/poste | NO |
| Frenos (por 80-100 m de estructura) | | Frenos en U 4xU150 | Frenos en U 4xU150 | Frenos en U 4xU300 | Frenos en U 4xU300 |

Tabla 3. Características de las pantallas RXE de la compañía GeoBrugg.

| | GEOBRUGG | | | | |
|-------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| TIPO | RXE-1000 | RXE-2000 | RXE-3000 | RXE-5000 | RXE-8000 |
| Energy level | 1000 | 2000 | 3000 | 5000 | 8000 |
| Red principal | ROCCO R7/3/300 | ROCCO 12/3/350 | ROCCO 16/3/350 | ROCCO 16/3/350 | ROCCO 19/3/300 |
| Malla auxiliar | | | | | |
| Postes | HEA 160 | HEA 200 | HEA 220 | HEA 220 | RRW 400 |
| Distancia entre postes | 8-12 m | 8-12 m | 8-12 m | 8-12 m | 8-12 m |
| Altura de la pantalla | 3-6 m | 4-7.5 m | 4-7.5 m | 5-9 m | 6-10.5 m |
| Diámetro cables | 16-22 m | 16-22 m | 16-22 m | 20-22 m | 22 mm |
| Frenos (por 80-100 m de estructura) | 4xU300-K1620 | 4xU300-R20 | 4xU300-R20 | 4xU300-R20 | 48xvarios |

Tabla 4. Características de las pantallas de las compañías MallaTalud Cantabria y Elite GTS.

| | MALLATALUD | | ELITE GTS | |
|---------------------------|--|--|------------------|-----------------|
| TIPO | IBT150 | IBT-500 | GTS 3000 | GTS 5000 |
| Energy level | 150 | 500 | 3000 | 5000 |
| Red principal | Cuadrada 200x200 d8 | Cuadrada 200x200 d8 | Omega d16 | Omega d16 |
| Malla auxiliar | Hexagonal | Hexagonal | | |
| Postes | Tubular 114,3 mm | Perfil en H | Tubular | Tubular |
| Distancia entre postes | 10 m | 10 m | 10,3 | 10,3 |
| Altura de la pantalla | 3 m | 4 m | 6,60 | 6,60 |
| Nº perimetral inferior | 1 | 1 | | 1 |
| Nº perimetral superior | 1 | 1 | | 1 |
| Diámetro cables | 16 mm | 22 mm | | |
| Vientos superiores | 1/poste | 2/poste | | |
| Frenos | Freno Mallatalud En los cables laterales y vientos superiores | Freno Mallatalud En los cables laterales y vientos superiores | | |

Tabla 5. Características de las pantallas TS de la compañía TRUMER.

| | TRUMER | | | | |
|------------------------|------------------------------|--|--|---|--|
| TIPO | TS-100-Oa | TS150 | TS250 | TS300-OA | TS500 |
| Energy class | 123 | 167 | 263 | 368 | 569 |
| Red principal | - | - | OMEGA 130 | OMEGA 130 | OMEGA 130 |
| Malla auxiliar | Alta Resistencia Ø4,6 #50 | Alta Resistencia Ø4,6 #50 | - | Alta Resistencia Ø4,6 #50 | |
| Postes | HEA 140 | HEA 100 | HEA 100 | HEA 160 | HEA 100 |
| Distancia entre postes | 8-12 m | 6-9 m | 6-9 m | 8-12 m | 6-9 m |
| Altura de la pantalla | 2,2 m | 2,25 m | 2,7 m | 3,15 m | 3 m |
| Nº perimetral inferior | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Nº perimetral superior | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Diámetro cables | 16 mm | 16 mm | 16 mm | 16 mm | 20 mm |
| Vientos superiores | No tiene | 2/poste | 2/poste | No tiene | 2/poste |
| Frenos | No tiene | AVT PHX 60/25-1.5. En los cables laterales, perimetral superior e inferior | AVT PHX 60/30-1.5. En los cables laterales, perimetral superior e inferior | AVT PHX 60/25-2,5 y 20-4,5. En los cables laterales, vientos superiores, perimetral superior e inferior | AVT PHX 60/25-2,5. En los cables laterales, vientos superiores, perimetral superior e inferior |

2.4 Caracterización de componentes

2.4.1 Cables

Los cables de acero empleados en este tipo de sistemas suelen tener diámetros comprendidos entre los 6 y 12 mm para las redes de cables y entre los 16 y 22 mm para los cables perimetrales y vientos, y suelen ser de tipo 6x19; 6x36; 7x19 ó 6x31(7x7+0) WS.

Para obtener la curva característica de cada tipo de cable se realizan ensayos de tracción sobre los mismos (Castro-Fresno et al., 2008). Las variables Fuerza y Desplazamiento obtenidas experimentalmente pueden ser fácilmente transformadas en tensión y deformación.



Figura 16. Ensayo de tracción sobre un cable de acero (Castro-Fresno et al., 2008)

En el presente trabajo se han realizado ensayos de tracción a cables de diámetro 10;16; 20 y 22 mm para obtener una caracterización completa de estos. Las curvas de comportamiento resultantes serán de gran importancia en la generación de los modelos numéricos que en siguientes apartados se definirán.

2.4.2 Anillos

Para realizar el ensayo se emplea una máquina de tracción, asegurando el anillo tanto en la parte superior como en la inferior empleando para ello 2 pernos que atraviesan sendas placas perforadas. Las curvas obtenidas en los ensayos tienen una primera parte con una pendiente baja, que se incrementa en una segunda parte en la que el anillo ya no se encuentra flojo entre los dos

pernos de fijación de la máquina, sino que los alambres que lo componen están siendo sometidos a una tracción directa.

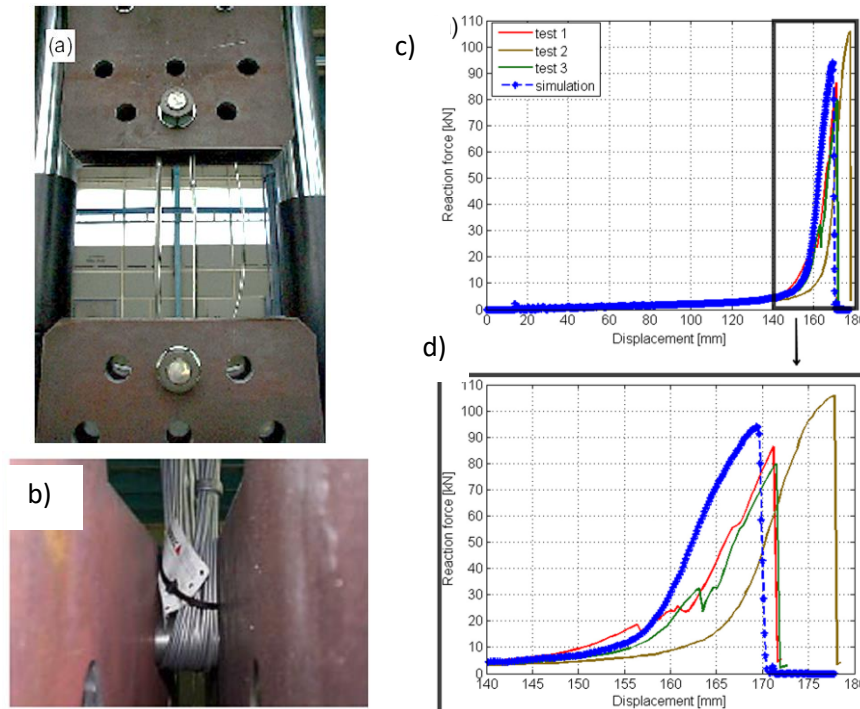


Figura 17. Ensayo de tracción de un anillo a) vista frontal, b) vista lateral, c) curva carga desplazamiento y d) curva carga desplazamiento con zoom (Escallón el al., 2014)

2.4.3 Alambres

En algunos casos, las membranas están formadas por mallas de alambre de simple o triple torsión siendo la parte principal que ha de resistir y transmitir todos los esfuerzos provenientes de la roca impactada, o bien formando una membrana secundaria cuyo objetivo es retener las rocas más pequeñas que la membrana principal, por su mayor tamaño de retícula, no es capaz de retener.

Los alambres son sometidos a ensayos de tracción de forma similar a los ensayos sobre los cables para conocer su curva característica, y determinar fundamentalmente su límite elástico y su resistencia a tracción máxima.



Figura 18. Ensayo de tracción de un alambre de la malla Tecco (Tesis Daniel Castro Fresno)

2.4.4 Grapas y clips

Tanto en las redes de cable de retícula cuadrada como en la red GTS se utilizan elementos que fijan la posición de los cables entre sí, llamados grapas o clips. Estos deben asegurar la integridad de los cables, por lo que sobrepasado un cierto límite de tensión (que irá en función de la carga máxima capaz de soportar el cable de la red) deben permitir el deslizamiento.

Sobre las grapas de la red de cables de retícula cuadrada se realizan 2 tipos de ensayos: de deslizamiento y de corte (Castro-Fresno et al., 2008). Estos ensayos se basan en el fallo de la grapa debida a deslizamiento o corte, sin llegar a la carga de rotura de los cables.

Ensayo de deslizamiento: determina la carga mínima a la que se produce el deslizamiento de un cable respecto al otro. La configuración del ensayo es la siguiente: manteniendo el cable horizontal fijo empleando para ello dos mordazas, se aplica una carga de tracción sobre el cable vertical (Figura 19a).

Ensayo de corte: determina la fuerza mínima de cortante que hace deslizar un cable respecto del otro. El ensayo se realiza fijando el extremo de uno de los cables con una mordaza y aplicando una carga de tracción sobre el extremo del cable que se cruza, ejerciendo así un esfuerzo de cortante sobre la grapa (Figura 19b).



Figura 19. Ensayos sobre la grapa MTC (Castro-Fresno et al., 2008); a) ensayo de deslizamiento, y b) ensayo de corte

En los clips fusibles empleados en la red G.T.S. se realizan ensayos de tracción como los que se muestran en la Figura 20 (Bertrand et al., 2012). La muestra se basa en 2 cables unidos por un clip. Para mantener el ángulo inicial de los cables semejante al real de la red se utilizan dos barras rígidas. En el caso que se muestra se han ensayado 2 tamaños de clip: a escala $\frac{1}{2}$ y a escala $1/1$.

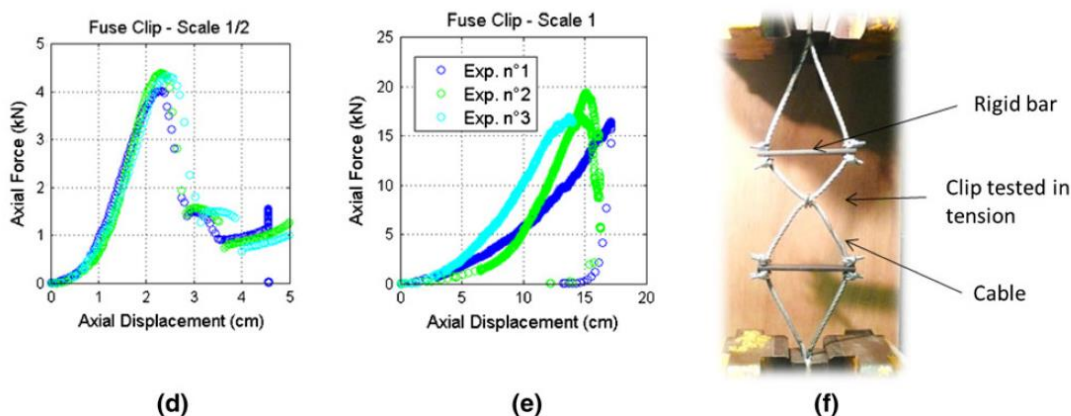


Figura 20. Ensayo de tracción sobre el clip de la malla GTS (Bertrand et al., 2012)

2.4.5 Membranas flexibles

Las membranas, formadas por los componentes anteriormente descritos, también son sometidas a ensayos de diversa índole.

2.4.5.1 Ensayos estáticos



Figura 21. Ensayos estáticos sobre membranas: a) de tracción lateral (Escallón et al., 2015) b) de punzonado (Castro-Fresno et al., 2008) y c) de carga uniformemente repartida (Castro-Fresno et al., 2008)

Ensayo de tracción lateral: la muestra se coloca en un bastidor que posee 3 laterales fijos y uno móvil desde donde se ejerce la fuerza de tracción. En los 4 laterales se restringe el desplazamiento vertical, mientras que el desplazamiento transversal sí está permitido. Esto se consigue mediante el uso de unas pinzas que sujetan la membrana y que tienen permitido el desplazamiento a lo largo de unas guías que posee el bastidor (Figura 21a).

Ensayo de punzonado: la muestra de red se fija en todo su perímetro (restringiendo las 3 direcciones de desplazamiento) a un bastidor diseñado para tal efecto, procurando que la membrana se ajuste perfectamente al mismo sin que se vea floja con el objetivo de minimizar la flecha inicial. El ensayo consiste en la aplicación de una carga vertical en el centro de la muestra,

usando para ello una prensa con una placa circular en su extremo, con el objetivo de encontrar la carga de rotura de la membrana (Figura 21b).

Ensayo de carga uniformemente repartida: la membrana se dispone sobre un bastidor de forma idéntica al ensayo de punzonado. Para garantizar el reparto uniforme de la carga se utiliza la misma prensa y la misma placa circular que la anterior, que presiona un cono de sacos de gravilla dispuestos inicialmente sobre la membrana (Figura 21c).

2.4.5.2 Ensayos dinámicos

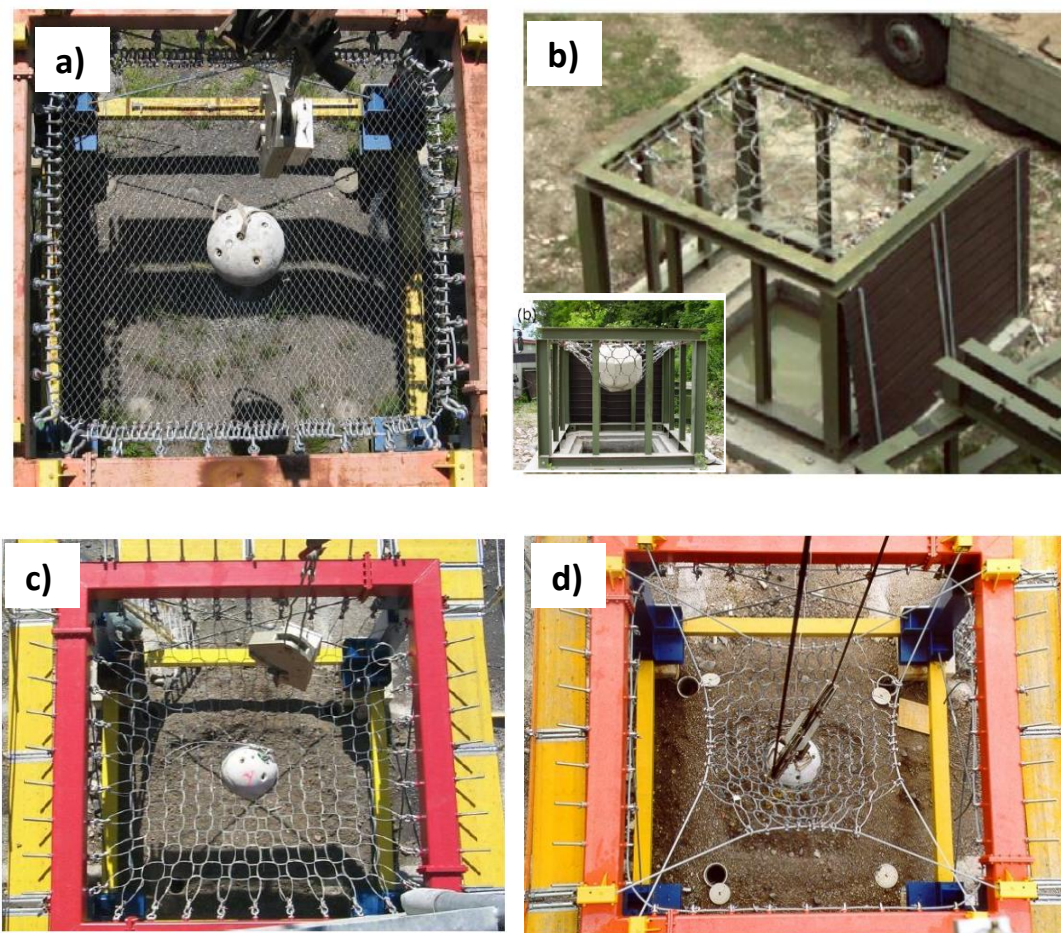


Figura 22. Ensayos dinámicos sobre redes de intercepción: a) (Von Boetticher et al., 2011) b) (Gentilini et al., 2013) c) (Grassl 2002) y d) (Volkwein A. 2004)

Estos ensayos consisten en el impacto de un bloque de hormigón, que se deja caer desde cierta altura, sobre la membrana. Controlando la altura y la masa del bloque se determina la energía del impacto. Se han encontrado en la bibliografía 4 formas diferentes de realizar la sujeción de la

membrana al bastidor. En la primera (Figura 21 a) la membrana flexible se fija en todo su contorno a un cable mucho más rígido, empleando para ello un grillete por cada cuadro de la retícula. El cable a su vez se encuentra adosado al bastidor fijo mediante grilletes de mayor tamaño dejando un mayor espacio entre ellos. El uso de grilletes para asegurar la red le permite un pequeño deslizamiento a lo largo de su contorno. En el segundo caso (Figura 21 b) se emplea un sistema similar, con la única diferencia de que el bastidor tiene instalado en las cuatro caras interiores del marco una barra metálica en lugar de un cable de acero. Cada retícula del contorno (en este caso cada anillo del contorno) se asegura mediante grilletes, al igual que en el caso anterior. El sistema de sujeción de la Figura 21 c es más restrictivo que los dos anteriores, ya que cada anillo del contorno se asegura a un perno con un cáncamo en su extremo, por lo que tienen una posición fija y concreta en el bastidor y no se permite ningún tipo de deslizamiento a lo largo de ninguna dirección del contorno. Por último, se tiene la fijación de la Figura 21 d, que consiste en fijar cada lateral de la membrana a ensayar a un cable diferente que se guía a través de las dos esquinas adyacentes y se anclan al terreno, añadiendo a ambos lados del cable 2 disipadores de energía que permiten un cierto incremento de su longitud.

2.4.6 Frenos

Debido a la gran variabilidad geométrica y forma de disipación de energía que tienen los frenos empleados en pantallas dinámicas, no existe un método de diseño estándar como ocurre en otros componentes de las pantallas tales como los sujetacables (EN 13411-5) o las placas de anclaje (EN 1537).

De entre todas las normativas, únicamente la ETAG 027 (EOTA 2008) proporciona recomendaciones para los frenos, sugiriendo la realización de ensayos cuasi-estáticos en una máquina de tracción, con una velocidad de ensayo de 2 mm/s, y admitiendo una elongación máxima de 1 metro. Dicho valor de máxima elongación es la única restricción de diseño, y se fija para limitar la máxima elongación de la barrera y evitar una invasión excesiva sobre la zona a proteger. La ausencia de cualquier otra indicación o metodología definida deja la puerta abierta a la libre elección en su colocación, número y capacidad de absorción.

Existen 3 lugares idóneos para instalar los frenos: los cables laterales, los cables superiores y los cables perimetrales. En pantallas de alta energía se han encontrado casos en los que los frenos se disponen en serie, aunque esta configuración no está certificada por la ETAG y la máxima elongación de 1 m ha de ser tomada en cuenta.

2.4.6.1 Ensayos experimentales

La caracterización del funcionamiento de un freno a través de su gráfica fuerza-desplazamiento es necesaria, ya que a través de ella se obtiene su capacidad de absorción de energía.

- Ensayo cuasi-estático

Fijando uno de los extremos de los cables del freno a un punto fijo se ejerce una carga de tracción sobre el otro extremo del cable empleando para ello una máquina de tracción horizontal o vertical. Los valores de carga aplicados al freno se miden mediante una célula de carga, y un sensor de desplazamiento registra esta medida entre los dos extremos del freno.

La mayoría de las compañías y grupos de investigación que han trabajado con el diseño de frenos emplean este tipo de ensayos para caracterizar sus productos (Smith and Duffy 1990; Peila et al. 1998; Grassl et al. 2003; Castro-Fresno et al. 2009; Bertrand et al. 2012; Fulde and Müller 2013) siguiendo las recomendaciones de la ETAG 027.

Las curvas carga-desplazamiento obtenidas con este tipo de ensayo siguen el mismo patrón:

1. Primera parte (O-A): deformación elástica. Hasta F_A , correspondiente a la fuerza de activación del freno.
2. Parte intermedia (A-B): funciona el principal mecanismo de absorción. Esta sección puede tener formas muy distintas: zigzag, onda, incremental o irregular, dependiendo de la tecnología del freno. Normalmente suele tener menor rigidez que la primera parte de la curva OA.
3. Parte final (B-C): al final del ensayo estático el sistema, compuesto por el freno y los cables, se comporta como un cable, presentando de nuevo un comportamiento más rígido.

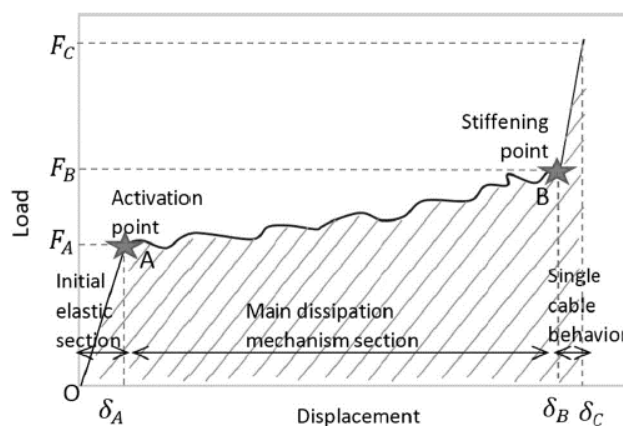

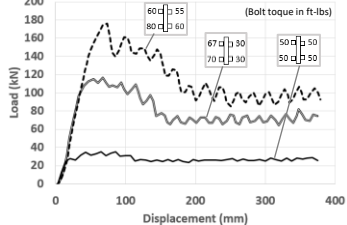

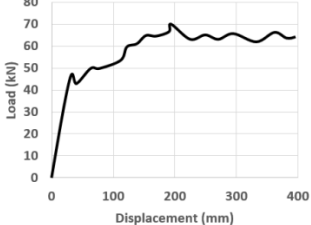

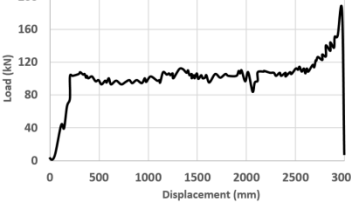

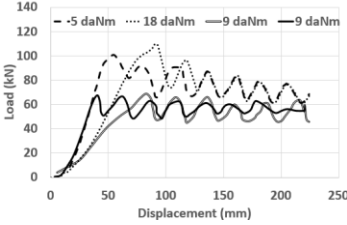

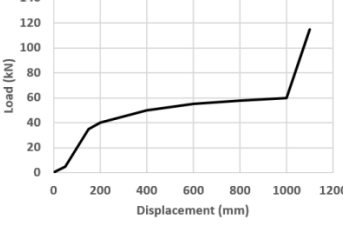

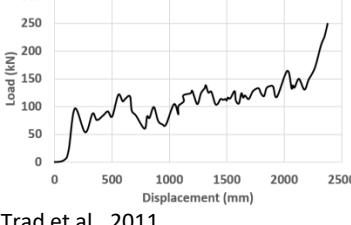

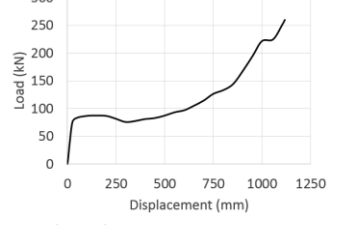
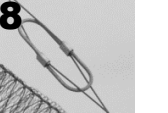
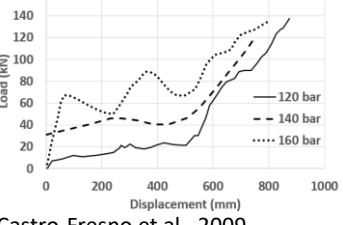

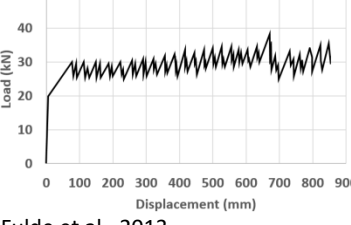


Figura 23. Curva genérica carga-desplazamiento de los frenos.

A continuación, se muestra una tabla resumen con las curvas de los frenos encontradas en la literatura.

Tabla 6. Curvas de comportamiento de distintos frenos obtenidas a partir del ensayo cuasi-estático.

| | | |
|---|---|---|
| <p>1</p>  <p> $F_A = 27-182 \text{ kN}$ $F_B = 27-182 \text{ kN}$ $F_C = -$ $\delta_A = 12.7-38 \text{ mm}$ $\delta_B = 381 \text{ mm}$ $\delta_C = -$ $E_{abs}/\delta = 26.09-75.81-103.04 \text{ kJ/m}$ </p>  <p>Smith et al., 1990</p> | <p>2</p>  <p> $F_A = 45 \text{ kN}$ $F_B = 62 \text{ kN}$ $F_C = -$ $\delta_A = 26 \text{ mm}$ $\delta_B = 381 \text{ mm}$ $\delta_C = -$ $E_{abs}/\delta = 48.5 \text{ kJ/m}$ </p>  <p>Smith et al., 1990</p> | <p>3</p>  <p> $F_A = 100 \text{ kN}$ $F_B = 110 \text{ kN}$ $F_C = 190 \text{ kN}$ $\delta_A = 208 \text{ mm}$ $\delta_B = 2666 \text{ mm}$ $\delta_C = 3000 \text{ mm}$ $E_{abs}/\delta = 100 \text{ kJ/m}$ </p>  <p>Trad et al., 2013</p> |
| <p>4</p>  <p> $F_A = 65-100 \text{ kN}$ $F_B = 45-68 \text{ kN}$ $F_C = -$ $\delta_A = 38-108 \text{ mm}$ $\delta_B = 210 \text{ mm}$ $\delta_C = -$ $E_{abs}/\delta = 38.97-41.56-56.38-62.02 \text{ kJ/m}$ </p>  <p>Peila et al., 1998</p> | <p>5</p>  <p> $F_A = 38 \text{ kN}$ $F_B = 62 \text{ kN}$ $F_C = 95 \text{ kN}$ $\delta_A = 150 \text{ mm}$ $\delta_B = 1010 \text{ mm}$ $\delta_C = 1035 \text{ mm}$ $E_{abs}/\delta = 24.56 \text{ kJ/m}$ </p>  <p>Peila et al., 1998</p> | <p>6</p>  <p> $F_A = 96.4 \text{ kN}$ $F_B = 140 \text{ kN}$ $F_C = 250 \text{ kN}$ $\delta_A = 190 \text{ mm}$ $\delta_B = 2210 \text{ mm}$ $\delta_C = 2370 \text{ mm}$ $E_{abs}/\delta = 100 \text{ kJ/m}$ </p>  <p>Trad et al., 2011</p> |
| <p>7</p>  <p> $F_A = 75.72 \text{ kN}$ $F_B = -$ $F_C = 260 \text{ kN}$ $\delta_A = 26.49 \text{ mm}$ $\delta_B = -$ $\delta_C = 920 \text{ mm}$ $E_{abs}/\delta = 59.35 \text{ kJ/m}$ </p>  <p>Grassl et al., 2003</p> | <p>8</p>  <p> $F_A = 7-60 \text{ kN}$ $F_B = 20-78 \text{ kN}$ $F_C = 140-160 \text{ kN}$ $\delta_A = 53-100 \text{ mm}$ $\delta_B = 180-720 \text{ mm}$ $\delta_C = 790-870 \text{ mm}$ $E_{abs}/\delta = 13-53.5-68.2 \text{ kJ/m}$ </p>  <p>Castro-Fresno et al., 2009</p> | <p>9</p>  <p> $F_A = 20 \text{ kN}$ $F_B = 30 \text{ kN}$ $F_C = -$ $\delta_A = 7.3 \text{ mm}$ $\delta_B = 850 \text{ mm}$ $\delta_C = -$ $E_{abs}/\delta = 29.16 \text{ kJ/m}$ </p>  <p>Fulde et al., 2013</p> |

- Ensayo dinámico tipo I

El diseño de un ensayo dinámico viene determinado por la necesidad de aproximar el freno a sus condiciones reales. El ensayo tipo I (Bertrand et al. 2012; Trad et al. 2013) consiste en fijar uno de los extremos del cable del freno a un punto fijo que se encuentra a cierta altura. El otro extremo se deja conectado a un bloque, que se deja caer libremente. Seleccionando la altura y peso del bloque se controla la energía que se aplica al sistema y que debe de absorber el freno. La fuerza se obtiene mediante una célula de carga. El desplazamiento se mide únicamente al final del ensayo. Se asume velocidad constante durante todo el ensayo, con lo que los desplazamientos intermedios se consideran proporcionales al tiempo. Esta consideración no es del todo adecuada, sobre todo en procesos en los que interviene la fricción y el proceso va a tirones.

- Ensayo dinámico tipo II

En este ensayo el freno se incluye en un cable colocado horizontalmente y fijado en los dos extremos. Una masa se deja caer verticalmente impactando contra el cable. Esto hace que trabaje el freno, siendo la carga medida a lo largo de todo el ensayo empleando una célula de carga. Simultáneamente, el incremento de longitud del cable con el freno se observa en una escala vertical.

- Ensayo dinámico tipo III

Otra forma de estudiar el comportamiento dinámico de los frenos es llevando a cabo un ensayo de impacto sobre una pantalla completa. Para evitar la interacción de resultados se recomienda colocar únicamente un freno por cable. La ventaja de este tipo de ensayos es que el estudio se hace con un impacto a la misma velocidad que en las condiciones reales, mientras que las desventajas son el alto coste y la necesidad de un gran dispositivo para montaje y ejecución de los mismos.

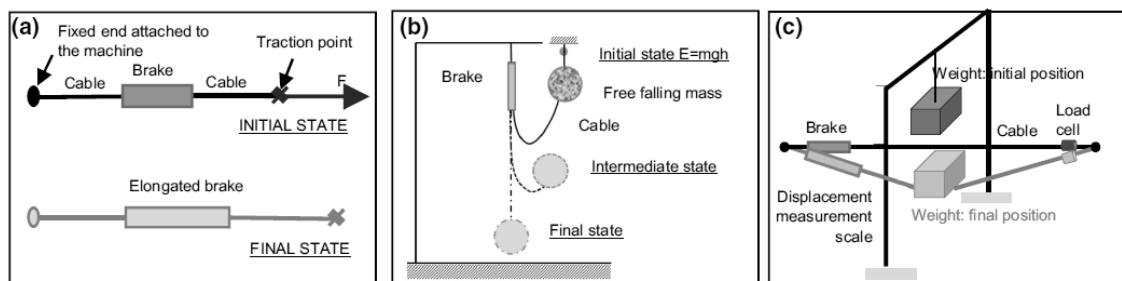

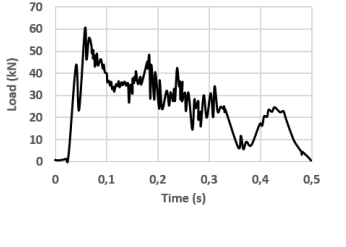

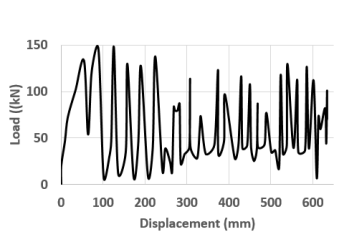

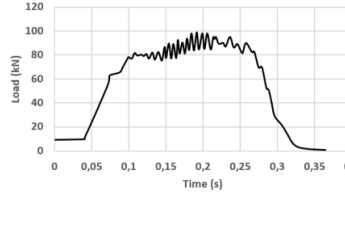

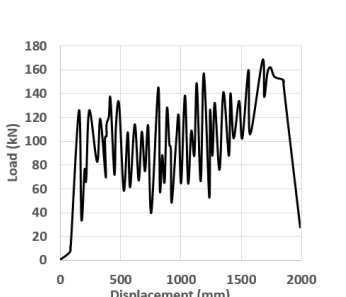
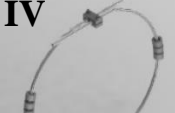
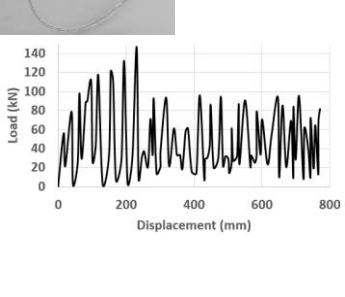


Figura 24. Tipología de ensayos sobre los frenos: a) ensayo estático, b) ensayo dinámico tipo I, y c) ensayo dinámico tipo II.

A continuación, se muestra una tabla resumen de las curvas de frenos obtenidas mediante ensayos dinámicos.

Tabla 7. Curvas de comportamiento de distintos frenos obtenidas a partir del ensayo dinámico.

| ENSAYO DINÁMICO TIPO 1: BLOQUE EN CAÍDA LIBRE (Trad et al., 2013; Bertrand et al., 2012) | ENSAYO DINÁMICO TIPO 2: IMPACTO (Tran et al, 2013a) | ENSAYO DINÁMICO TIPO 3: DENTRO DE UNA PANTALLA COMPLTA (Fulde et al., 2013) |
|--|---|--|
| <div data-bbox="268 584 443 696">  </div> <div data-bbox="459 584 614 696"> $F_A = 45 \text{ kN}$ $F_B = 22 \text{ kN}$ $\delta_A = -$ $\delta_B = -$ $E_{abs}/\delta = -$ </div> <div data-bbox="268 712 614 958">  </div> | <div data-bbox="646 584 821 696">  </div> <div data-bbox="837 584 992 696"> $F_A = 133.2 \text{ kN}$ $F_B = 60 \text{ kN}$ $\delta_A = 54.1 \text{ mm}$ $\delta_B = 630 \text{ mm}$ $E_{abs}/\delta = 58.52 \text{ kJ/m}$ </div> <div data-bbox="646 712 992 958">  </div> | <div data-bbox="1024 584 1200 696">  </div> <div data-bbox="1216 584 1370 696"> $F_A = 65 \text{ kN}$ $F_B = 93 \text{ kN}$ $\delta_A = -$ $\delta_B = -$ $E_{abs}/\delta = -$ </div> <div data-bbox="1024 712 1370 958">  </div> |
| <div data-bbox="268 972 443 1084">  </div> <div data-bbox="459 972 614 1084"> $F_A = 125 \text{ kN}$ $F_B = 150 \text{ kN}$ $\delta_A = 125 \text{ mm}$ $\delta_B = 1750 \text{ mm}$ $E_{abs}/\delta = 130.71 \text{ kJ/m}$ </div> <div data-bbox="268 1099 614 1395">  </div> | <div data-bbox="646 972 821 1084">  </div> <div data-bbox="837 972 992 1084"> $F_A = 56 \text{ kN}$ $F_B = 50.2 \text{ kN}$ $\delta_A = 16.5 \text{ mm}$ $\delta_B = 770 \text{ mm}$ $E_{abs}/\delta = 46.53 \text{ kJ/m}$ </div> <div data-bbox="646 1099 992 1395">  </div> | |

2.5 Guías de aptitud para el uso

El proceso de diseño de una pantalla dinámica puede descomponerse en tantas subdivisiones como componentes tiene la estructura. El hecho que exista variabilidad a la hora de definir cada uno de los componentes hace difícil la creación de una normativa al respecto. Cada fabricante es responsable de la creación de las pantallas, siempre teniendo en cuenta el objetivo último, que es la retención de rocas en taludes inestables con la mayor eficacia posible.

Por ello, existen varios documentos que ofrecen pautas para la aprobación de las pantallas a través de la ejecución de ensayos de campo sobre las mismas.

Los documentos de mayor relevancia son:

- ETAG 027 “Guideline for the European technical approval of falling rock protection kits”, publicado por la EOTA (European Organisation for Technical Assessment) y la nota técnica elaborada por Peila et al., 2009 al respecto de dicha norma.
- “Guideline for the approval of rockfall protection kits”, publicado por la SAEFL (Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape). Gerber W, 2001.
- NF P95-308 (France): “Écrans de filets – Équipements de protection contre les éboulements rocheux”

Desde el año 2008, la guía ETAG 027 se ha convertido en la más seguida debido a que se usa como base para el marcado CE de los productos.

2.5.1 Obtención del marcado CE

En la actualidad no existe ninguna normativa europea que obligue al marcado CE de las pantallas dinámicas.

Tanto en la directiva de productos de construcción, DPC (Directiva 89/106/CEE) como en el reglamento de productos de construcción, RPC (Nº305/2011) que remplace a la directiva anterior en el año 2013, se detallan listas de productos que requieren de certificación CE. Sin embargo, las pantallas dinámicas o flexibles para retención de rocas no aparecen en ninguno de los documentos como sistemas que deban cumplir con el marcado CE de forma obligatoria.

La Organización Europea para la Evaluación Técnica (EOTA por sus siglas en inglés) se creó tras el surgimiento de la DPC. De acuerdo a dicha directiva, un documento ETA (European Technical Approval) puede servir de base para el proceso de certificación de un producto en ausencia de una norma armonizada (siendo la certificación en este caso voluntaria). Por ello, la EOTA desarrolló una guía llamada “Guideline for the European technical approval of falling rock protection kits”.

La nueva terminología del reglamento es:

| Directiva 89/106/CEE (derogada) | | Reglamento (UE) 305/2011 | |
|---------------------------------|---|--------------------------|---|
| RE | Requisitos esenciales Características | RB | Requisitos básicos de las obras de construcción Características esenciales |
| -- | Declaración de conformidad CE (EC conformity declaration) | DoP | Declaración de prestaciones (Declaration of Performances) |
| DITE (ETA) | Documento de Idoneidad Técnica Europeo (European Technical Approval) | ETE (ETA) | Evaluación Técnica Europea (European Technical Assessment) |
| Guía DITE (ETAG) | Guía de DITE (ETA Guideline) | DEE (EAD) | Documento Evaluación Europea (European Assessment Document) |
| CUAP | Common Understanding Assessment Procedure | | |
| -- (AB) | Organismo de DITE (Approval Body) | OET (TAB) | Organismo de Evaluación Técnica (Technical Assessment Body) |

Figura 25. Tabla de equivalencia entre la Directiva 89/106/CEE y el nuevo Reglamento 305/2011

A partir de 2011, con el desarrollo del Reglamento 305/2011, tanto la nomenclatura de ciertas figuras (Figura 25) como el procedimiento de certificación varió ligeramente, siendo en la actualidad de la siguiente manera: en ausencia de una norma europea armonizada que cubra las prestaciones de las pantallas dinámicas, si el fabricante desea voluntariamente realizar el marcado CE de su producto, él define las prestaciones que desee presentar dentro de su Declaración de Prestaciones (DoP) y pide a un Organismo de Evaluación Técnica (OET) que proponga un programa de evaluación correspondiente a esas demandas. El texto de la ETAG 027 puede servir de documento de evaluación europea para un cierto número de prestaciones (energía de impacto, elongación, altura residual, etc.) con el fin de obtener el marcado CE sobre estas. También es posible que se publiquen nuevos documentos de evaluaciones europeas para obtener el marcado CE de otras prestaciones no tenidas en cuenta en la ETAG 027.

Aun no siendo obligatorio el marcado CE de estos productos, existen compañías que lo realizan por la repercusión positiva que representa en cuanto al incremento del nivel de confianza que puede aportar a los posibles compradores del producto.

2.5.2 Descripción de la ETAG 027

Según esta guía, el ensayo consiste en el lanzamiento de bloques a la pantalla (también llamada kit), midiendo la velocidad del bloque antes del impacto, determinando por tanto su energía de impacto, que corresponde a la energía cinética del mismo.

El mínimo contenido de un kit consiste en 3 módulos funcionales, compuestos de una red de intercepción, postes actuando como soporte de dicha red y componentes de conexión tales como cables perimetrales, vientos y disipadores de energía que transmiten las cargas al terreno.

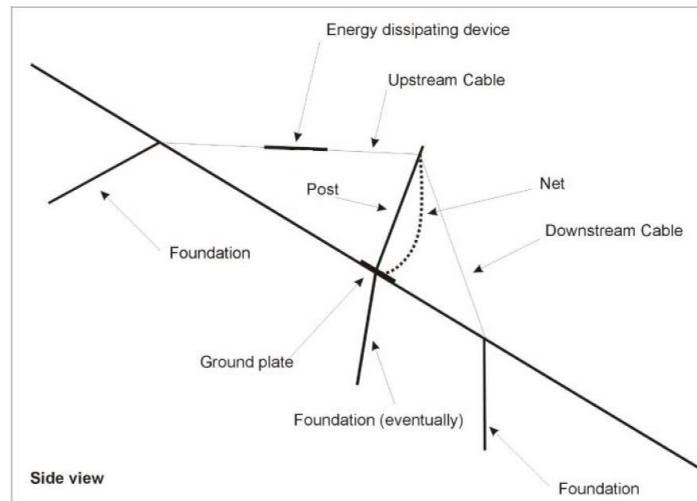


Figura 26. Vista lateral de una pantalla dinámica (también llamada kit) tal y como se define en la ETAG 27.

La trayectoria del bloque se inscribe en un plano ortogonal a la línea de conexión entre las bases del poste del kit. La configuración del ensayo puede ser vertical o inclinado, y la velocidad media del bloque en el último metro antes del instante de contacto con la red debe de ser mayor o igual a 25 m/s. Se realizan 3 impactos secuenciales con 2 niveles de energía diferentes: energía de servicio (SEL por su denominación en inglés "Service Energy Level") y energía máxima (MEL por su denominación en inglés "Maximum Energy Level").

Existen dos medidas importantes que son tenidas en cuenta en los criterios de superación de las pruebas. La altura nominal, que se mide ortogonalmente a la pendiente de referencia, se define como la mínima distancia entre el cable perimetral superior y la línea de conexión entre las bases de los postes antes del impacto. Por otra parte, la altura residual es la mínima distancia entre el cable perimetral inferior y el perimetral superior, medida ortogonalmente a la pendiente de referencia después de producirse el ensayo y sin quitar el bloque de la pantalla.

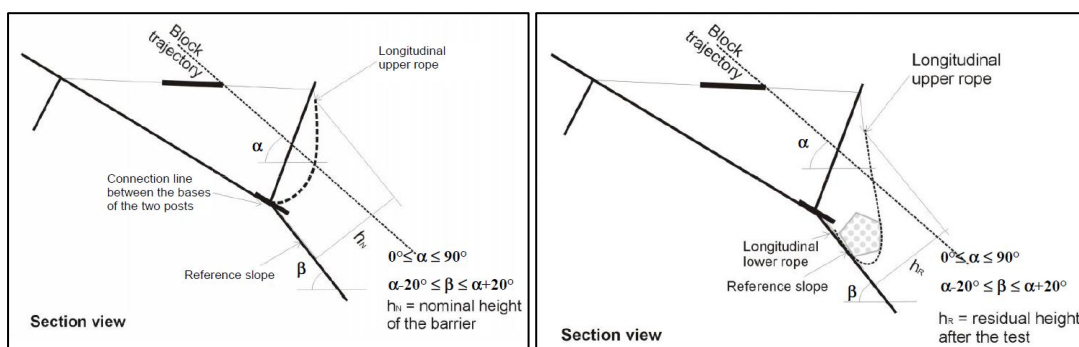


Figura 27. Altura nominal (izda.) y altura residual (dcha.) definidas en la ETAG 027.

Mediante el ensayo con nivel de energía de servicio se comprueba la resistencia del kit a impactos secuenciales. Para ello, se realizan 2 lanzamientos sin posibilidad de realizar cambios o sustituciones a ningún componente del kit.

El primer lanzamiento se supera si se cumple que:

- El bloque es parado por el kit.
- No se producen rupturas en los componentes de conexión.
- La altura residual del kit después del test es mayor o igual al 70% de la altura residual.
- La altura de la red en los postes debe ser superior a la altura residual.
- El bloque no toca el suelo antes de que el kit alcance su máxima elongación.

Por su parte, el segundo lanzamiento se supera si:

- El bloque es parado por el kit.
- El bloque no toca el suelo antes de que el kit alcance su máxima elongación.

El ensayo con nivel de energía máximo tiene como objetivo la caracterización de la capacidad máxima con un único impacto del bloque. Este nivel de energía será el triple que el nivel de energía de servicio.

La pantalla supera este ensayo si:

- El bloque es parado por el kit.
- El bloque no toca el suelo antes de que el kit alcance su máxima elongación.

2.6 Instrumentación de pantallas dinámicas

2.6.1 Dispositivos de medida de fuerza en cables

Para la obtención de las fuerzas en los cables en los ensayos experimentales de pantalla completa se plantean dos sistemas.

El primero de ellos implica la fabricación de células de carga ad hoc para este fin. Una célula de carga es una pieza metálica a la que se le adhiere extensometría eléctrica y mediante la cual (previa calibración en una máquina de tracción) es posible transformar la tensión de dicha pieza en carga axial de los cables. Esta pieza metálica dispone de sujeciones en ambos extremos de forma que se puede insertar en cualquier cable, sin más que cortar dicho cable y enlazarlo a la célula. Las células de carga se diseñan de tal forma que no alcancen en ningún momento el rango plástico del acero del que está compuesto teniendo en cuenta la capacidad máxima de carga prevista en los cables.

La segunda opción (y la empleada a lo largo de este trabajo) es el uso de sensores de fuerza como los que se muestran en la Figura 28 (Blanco-Fernandez et al. 2013). Son sensores comerciales que comúnmente se emplean para obtener la tensión de los cables de ascensor. El sensor está formado por una viga principal, dos apoyos externos y un marco desmontable que facilita la instalación del sensor. El mecanismo de funcionamiento es el siguiente: en la posición inicial, el cable no se encuentra alineado, sino que los dos apoyos exteriores y el guiado a través del marco hace que se encuentre ligeramente doblado. Al aplicar tensión sobre el cable, este tiende a alinearse flexionando la viga y provocando tracción en su cara inferior (la más cercana al cable) y compresión en la cara superior (Figura 28c). Estos esfuerzos son medidos por unas galgas extensométricas que se encuentran en el interior de la viga y que son correlacionados con la fuerza axial del cable. Esta correlación se ha de calibrar previamente empleando para ello una máquina de tracción universal.

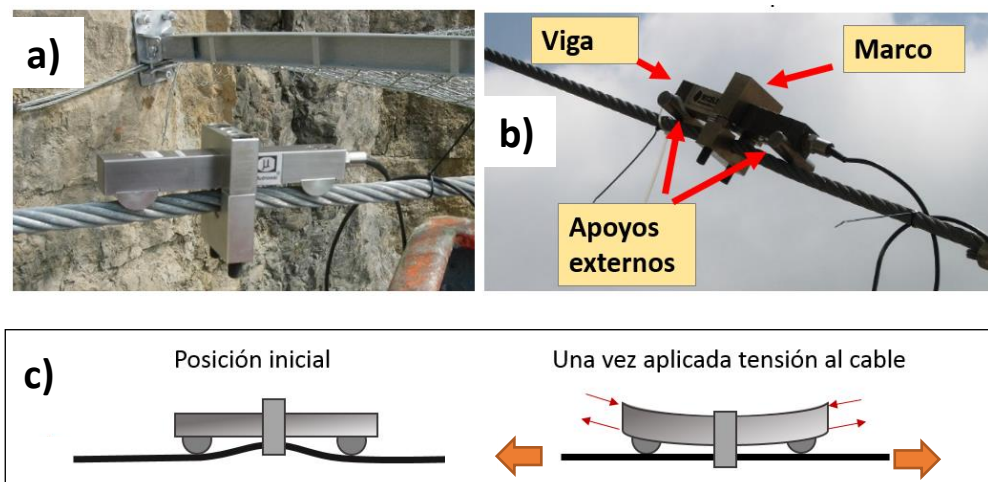


Figura 28. Sensor de fuerza: a) aspecto general una vez instalado en el cable, b) partes del sensor y c) esquema de funcionamiento.

2.6.2 Dispositivos para medida de desplazamientos y velocidades

Siguiendo la recomendación de la ETAG 027, se ha de emplear al menos una cámara de alta velocidad. Las cámaras de las que GITECO dispone son capaces de capturar 100 fotogramas por segundo y se han de colocar en dos posiciones diferentes, una con un enfoque frontal y otra con un enfoque de perfil.

2.6.3 Dispositivos de medida en los anclajes

La guía ETAG 027 únicamente establece como requisito la medida de las acciones en los anclajes si se trata de pantallas que no dispongan de vientos superiores. En caso de requerirse, la norma da libertad y no especifica ni cómo ni dónde se debe realizar dicha medida. Una de las múltiples soluciones que se adoptan es la utilización de células de carga de presión entre la placa de anclaje y la tuerca del bulón (Arndt et al., 2013). Otros sistemas de medida más complejos tratan de obtener la presión total resultante perpendicular al terreno, así como las cargas laterales que puedan darse en el punto de medida. Este sistema requiere de un dispositivo más costoso tanto por el material empleado como la instalación, ya que requiere la perforación de, como mínimo, 4 puntos de anclaje adicionales para la puesta en obra del dispositivo (Turner et al., 2009). El último dispositivo encontrado en la literatura (Volkwein et al 2016) trata de reducir las dimensiones del anterior basado en el uso de 4 sensores triaxiales con las que se obtendrán las reacciones en los 6 grados de libertad.

2.7 Modelos numéricos de resolución

2.7.1 El método de los elementos discretos

El método de los elementos discretos (DEM) es un modelo numérico usado para describir el comportamiento mecánico de cuerpos discontinuos (Cundall and Strack 1979). Los modelos que emplean este método están formados por un conjunto de partículas que interactúan entre sí, quedando definidos por sus contactos e interacciones.

Las principales características que definen este método de análisis numérico son:

- Las partículas son elementos discretos que en su conjunto conforman el sistema complejo de partículas.
- Estos elementos discretos se desplazan independientemente uno de otros e interaccionan entre sí en las zonas de contacto.
- El modelo constitutivo que define el comportamiento global del material es establecido en las zonas de contactos entre partículas.

La resolución de este método se realiza empleando la segunda ley de Newton. Esta establece que la fuerza que actúa sobre cada partícula es igual a la masa de cada elemento distinto o discreto por su aceleración.

$$f_i = m_i a_i = m_i \frac{dv_i}{dt} = \frac{d}{dt}(m_i v_i)$$

Teniendo en cuenta que la cantidad de movimiento de una partícula es el producto de su masa por su velocidad, es posible expresar la fuerza actuando sobre el elemento discreto mediante la siguiente expresión:

$$R(t) = \sum_i f_i = \sum_i m_i a_i = \sum_i m_i \frac{dv_i}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\sum_i m_i v_i \right)$$

partiendo del principio que se cumple el principio de conservación de la masa $\left(\frac{dm_i}{dt} \right) = 0$

El sistema de fuerzas puede estar en equilibrio estático cuando estas no están en movimiento o no actúan fuerzas sobre los diferentes elementos distintos o el medio en cuestión. Las fuerzas, los desplazamientos, tensiones y deformaciones son determinados a nivel de cada contacto entre los elementos discretos. En correspondencia con el modelo constitutivo empleado estos elementos mecánicos son descompuestos en sus componentes hidrostática y desviadoras.

2.7.2 Modelos desarrollados empleando elementos discretos

El primer documento en el que se desarrolló un modelo de pantalla dinámica fue en Nicot et al. 2001. La estructura de intercepción estaba formada por una red de anillos, y fue simplificada dentro del modelo completo asociando cada anillo a un elemento discreto situado en su centro y estableciendo interacciones entre ellos en forma de barras imaginarias, formando una red ficticia semejante a la real, que fue calibrada mediante un ensayo de tracción sobre una muestra tejida de 7 anillos. La red ficticia se conectó a los cables perimetrales mediante una unión fija sin posibilidad de deslizamiento. Los postes se empotraron al terreno, siendo atravesados en ambos extremos por los vientos superiores, ejerciendo un guiado de los mismos en la dirección perpendicular al plano de la pantalla.

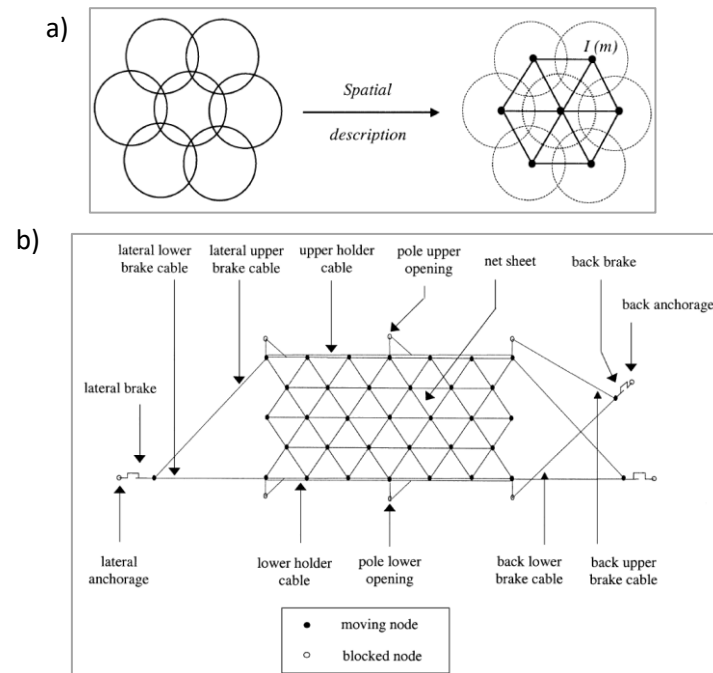


Figura 29. Modelo de elementos discretos según (Nicot et al., 2001) a) Simplificación de la red de anillos y b) Esquema de comportamiento y conexiones del modelo completo.

Una vez creado el modelo completo, se comprobaron la elongación de los frenos, el tiempo que la estructura tarda en frenar el bloque y el incremento de la fuerza sufrida por algunos de los cables en un segundo impacto.

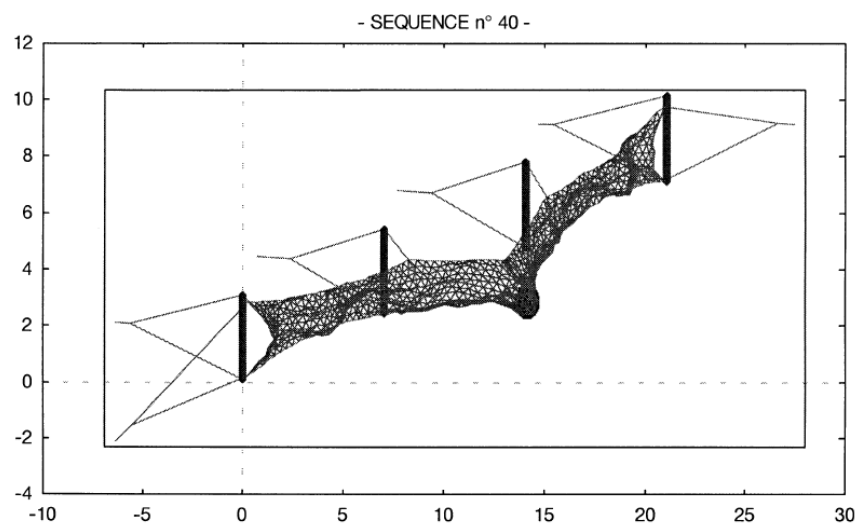


Figura 30. Resultados del modelo de elementos discretos según (Nicot et al., 2001).

Otro modelo encontrado en la literatura que emplea el método de elementos discretos (MED) es el de Bertrand et al., 2011 y Trad, A. 2011. Estos realizan una simplificación de la red de cables con una concepción diferente a la anterior. En este caso los puntos de contacto entre los cables que componen la red son los que se modelizan mediante partículas, que interaccionan entre sí según una conexión que se asemeja al comportamiento de un cable y que se calibra a partir de ensayos de punzonado y de tracción.

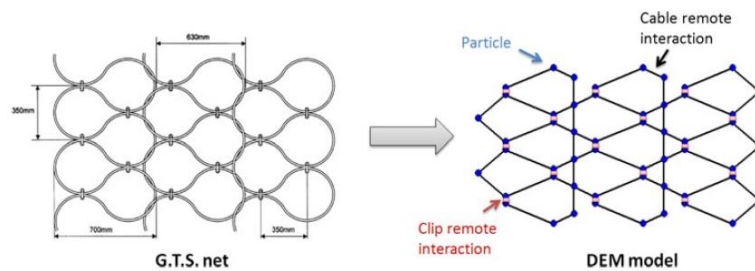


Figura 31. Modelo de elementos discretos según (Bertrand et al., 2011) a) Geometría real de la red G.T.S. y b) Simplificación de la red mediante MED

A partir de este modelo se realizó un análisis de la evolución temporal de la posición, velocidad y cargas sobre el bloque que impacta en la pantalla, así como un análisis de la disipación de energía de varios frenos ubicados en la pantalla dependiendo de la energía de impacto del bloque.

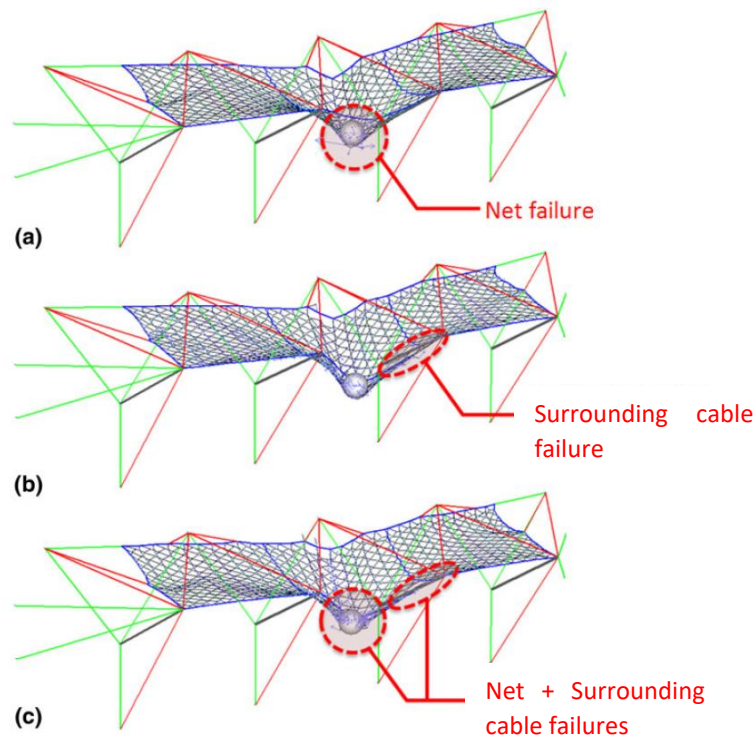


Figura 32. Resultados del modelo de elementos discretos según Bertrand et al. (2011)

El tercer y último modelo observado es el desarrollado por Bourrier et al., 2013. Esta pantalla diseñada para la retención de rocas tiene la particularidad de estar sujeta a los troncos de dos árboles que actúan a modo de postes manteniendo la red extendida.

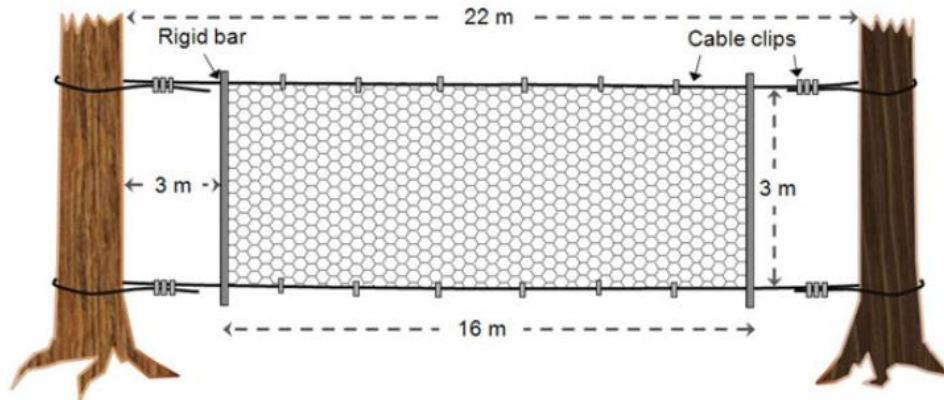


Figura 33. Aspecto de la pantalla modelada por (Bourrier et al., 2013)

La red de intercepción empleada es una malla de alambre de triple torsión. En este caso, las partículas se situaron en los vértices de cada hexágono de la retícula (puntos verdes en la Figura 30), además de en las intersecciones de los alambres con los cables superiores inferiores y barra lateral (puntos azules y rojos de la Figura 30). Además, se utilizaron 5 tipos diferentes de enlaces entre partículas correspondientes a: alambre sencillo de la malla, alambre doble de la malla, cable de soporte (superior e inferior), barra rígida y cables que conectan los arboles con las barras.

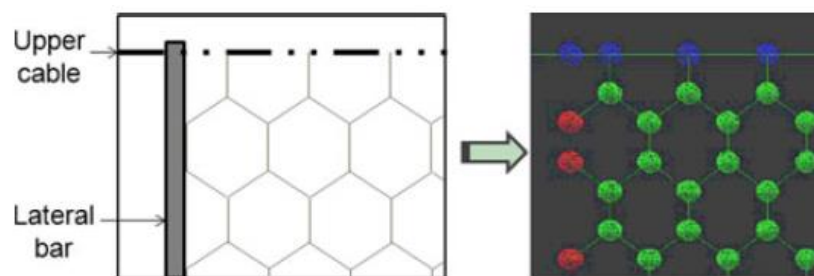


Figura 34. Simplificación de la malla de triple torsión mediante MED (Bourrier et al., 2013)

Combinando simulaciones de caída de rocas y simulaciones de impacto sobre la pantalla con DEM se realizó un análisis probabilístico para comprobar la idoneidad de la pantalla en una ubicación determinada. Haciendo variar dos parámetros asociados a la cinemática del bloque como son

masa y la velocidad lineal se determinó la probabilidad de que el bloque sobrepasase la pantalla en ese punto.

2.7.3 El método de los elementos finitos

En general, la resolución del problema, especialmente cuando se trata de elementos mecánicos o estructurales, implica un conjunto de ecuaciones diferenciales, cuya solución es demasiado compleja para ser resuelta mediante métodos analíticos clásicos debido, por ejemplo, a la geometría, condiciones de contorno, propiedades locales del material, etc.

Una posible alternativa consiste en aplicar el método de los elementos finitos (MEF), que proporciona una solución numérica aproximada de las ecuaciones diferenciales que definen el problema. El MEF se basa en la transformación de un medio continuo con infinitos grados de libertad en pequeñas partes llamadas elementos, que lo convierten en un problema discreto con finitos grados de libertad. A dicha transformación se le llama “discretización” (Figura 35).

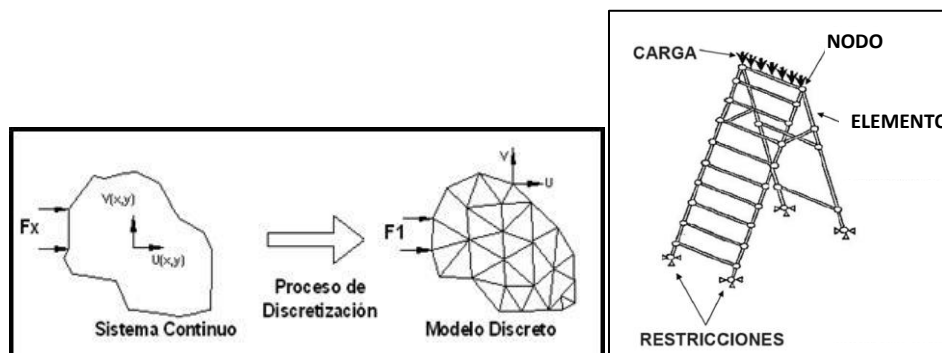


Figura 35. Ejemplo de discretización de un medio continuo (izda.) y partes de un modelo de elementos finitos (dcha.).

Un modelo de elementos finitos está formado por:

- **Nodos:** puntos localizados por sus coordenadas en el espacio, donde se considera que existen los GDL y las acciones sobre el sistema físico.
- **Elementos:** el comportamiento de cada elemento queda definido a través de las funciones de interpolación o funciones de forma. La información se transmite a través de los elementos de un mismo sólido mediante los nodos comunes. Dichos nodos comparten los mismos grados de libertad. Por tanto, los elementos son una representación matemática matricial denominada matriz de rigidez que relaciona los grados de libertad (GDL) de un conjunto de nodos.
- **Cargas y restricciones:** condiciones de contorno del modelo.

Las etapas en el procedimiento de cálculo son las siguientes

1. Preproceso: subdivisión del dominio en elementos finitos
2. Formulación del elemento: desarrollo de ecuaciones para los elementos (en general desarrollo de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales en su forma débil)
3. Ensamblaje: obtención de las ecuaciones del sistema completo a partir de las ecuaciones de los elementos individuales.
4. Resolución de las ecuaciones
5. Postproceso: cálculo de las cantidades de interés, tales como tensiones, deformaciones y visualización de la respuesta

Estática versus dinámica en MEF

El método de resolución del MEF para sistemas cuasi-estáticos se rige por la siguiente ecuación:

$$\{F\} = [K] \cdot \{x\}$$

Donde:

$\{F\}$ es el vector de cargas

$[K]$ es la matriz de comportamiento o de rigidez del sistema

$\{x\}$ es el vector de desplazamientos nodales

En sistemas dinámicos, la inercia y el amortiguamiento también son variables a tener en cuenta en la ecuación de resolución del modelo. La dependencia del tiempo actual debe ser considerada explícitamente, porque el cálculo de fuerzas inerciales requiere tomar derivadas con respecto al tiempo actual.

$$\{F\} = [K] \cdot \{x\} + [C]\{\dot{x}\} + [M]\{\ddot{x}\}$$

Donde:

$\{F\}$ es el vector de cargas

$[K]$ es la matriz de comportamiento o de rigidez del sistema

$\{x\}$ es el vector de desplazamientos nodales

$[C]$ es la matriz de amortiguamiento viscoso

$[M]$ es la matriz de masa que describe la distribución de la masa sobre los GDL

$\{\dot{x}\}$ y $\{\ddot{x}\}$ son la primera y segunda derivadas del desplazamiento respecto del tiempo (esto es, la velocidad y la aceleración)

El mínimo incremento estable de tiempo para el cálculo dinámico se define comúnmente como el menor tiempo de tránsito de una onda dilatacional a través de cualquiera de los elementos de la malla. Esta definición corresponde a la siguiente expresión:

$$\Delta t \approx \frac{L_{min}}{c_d}$$

Donde L_{min} es la menor dimensión de un elemento de la malla y c_d es la velocidad de propagación de una onda longitudinal en el material. Dicha velocidad se calcula, a su vez, según la expresión:

$$c_d = \sqrt{E/\rho}$$

Donde E es el módulo elástico del material y ρ es la densidad.

La resolución de los sistemas de ecuaciones que genera un modelo MEF es difícilmente abordable si no se hace empleando programas comerciales de elementos finitos.

Los programas más extendidos son los siguientes:

ANSYS

Este software de elementos finitos posee una estructura modular (Figura 36), y es usado comúnmente para simular modelos de todas las disciplinas: física, estática y dinámica estructural, dinámica de fluidos, transferencia de calor y electromagnetismo. Los módulos de mayor interés para los objetivos que conciernen a la presente tesis son el Structural (para problemas cuasi-estáticos), Autodyn y LS-Dyna (ambos proporcionando soluciones a problemas dinámicos).

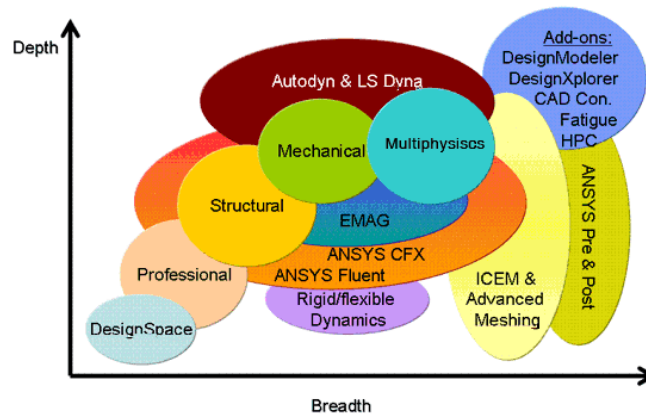


Figura 36. Estructura modular que presenta el software ANSYS (Fuente:

<http://www.figes.com.tr/english/ansys/ansys.php>)

LS-DYNA

El origen del código reside en el análisis altamente no lineal correspondiente a problemas dinámicos, empleando para ello integración explícita del tiempo. El código de este programa fue comprado por ANSYS para crear su módulo Ansys LS-DYNA.

Abaqus

Abaqus es un software de cálculo por elementos finitos, que dispone de dos métodos de resolución principales y una interfaz que incorpora todos los módulos necesarios para una utilización intuitiva:

- Abaqus/Standard: módulo de resolución para análisis estáticos y dinámicos de baja velocidad, donde la localización de concentración de esfuerzos es crítica
- Abaqus/Explicit: módulo de resolución para el cálculo de eventos dinámicos o de conducta no lineal como los que pueden aplicarse a productos de consumos electrónicos, automotrices o balísticos, donde se involucre caída libre, choques e impactos.
- Abaqus/CAE: incorpora los módulos de análisis Standard y Explicit en un entorno completo de Abaqus (Complete Abaqus Enviroment) para la modelización, manejo y monitorización y visualización de resultados.

2.7.4 Modelos desarrollados empleando elementos finitos

El desarrollo de modelos de pantallas dinámicas mediante esta técnica numérica cuenta con una trayectoria más larga que la correspondiente a la modelización con elementos discretos (MED).

Por ello se han encontrado una gran cantidad de modelos en la literatura que aproximan las pantallas desde diferentes enfoques.

En primer lugar, podríamos agrupar los trabajos de Gentilini et al., 2012 y Gentilini et al., 2013, cuyos modelos presentan características similares. En ellos premia la simplicidad frente al detalle, teniendo como consecuencia un bajo coste computacional. Las principales simplificaciones se basan en la minimización del número de interacciones con fricción que implica una reducción de las no linealidades del problema. Así, las redes de intercepción compuestas por un tejido de anillos se representan mediante barras rectas que unen los centros de cada uno de los anillos, tal y como hizo Nicot et al. 2001 en su modelo MED. Además, la conexión entre las redes de intercepción y los cables perimetrales se realiza mediante la unión directa con un componente de tipo barra, con lo que no se permite ningún deslizamiento.

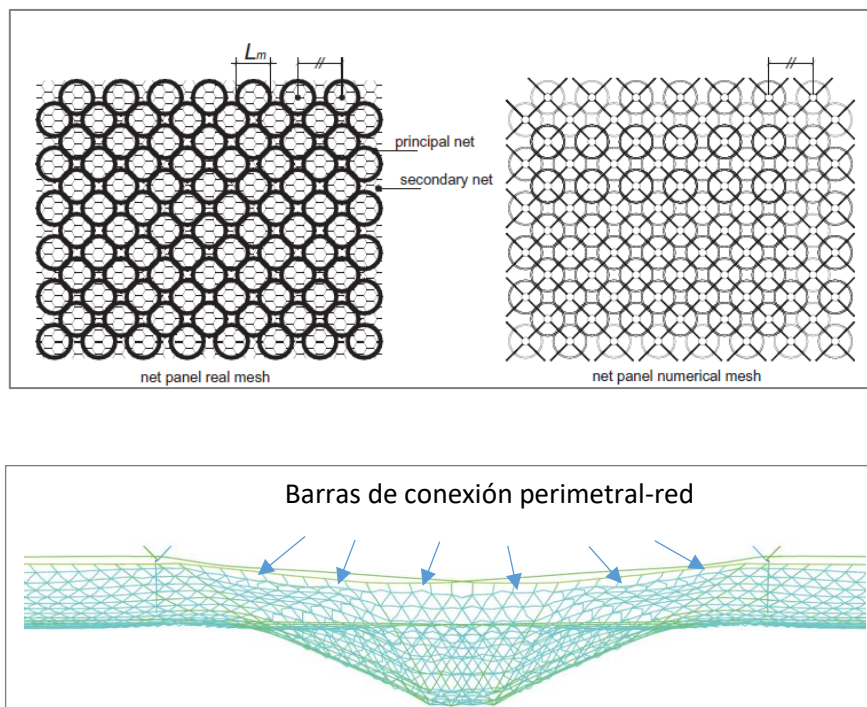


Figura 37. Simplificaciones de los modelos presentados por Gentilini et al. 2012: a) modelización de la red de anillos mediante cables rectos, y b) elementos de conexión entre la red y los cables perimetrales.

En el mismo grupo se podrían incluir también los trabajos de De Miranda et al., 2015 y de Mentani et al., 2016, que se centran en el análisis de pantallas de baja energía y semi-rígidas. En el primer caso se trató de caracterizar y determinar la capacidad energética de 4 tipos diferentes de pantallas semirrígidas que fueron instaladas en Italia en décadas pasadas y de las que no se

disponen de datos de su resistencia estructural. En el segundo trabajo, la simulación numérica de una pantalla de baja energía se complementa con ensayos experimentales realizados en el laboratorio. En ambos, los modelos tratan de aprovecharse de ciertas características de Abaqus que simplifican en gran medida los modelos. Estos son los llamados conectores, permiten relacionar 2 nodos entre sí determinando los grados de libertad que se encuentran restringidos y/o libres entre ellos (Figura 38). Los dos conectores empleados en estos trabajos son los de tipo slot y de tipo axial. El conector de tipo slot permite el desplazamiento de uno de los nodos en una sola dirección respecto a otro nodo que permanece fijo. El conector axial, por su parte, permite el desplazamiento de un nodo respecto al otro únicamente en la dirección del eje que forman los dos nodos, y no la permite en ninguna otra dirección.

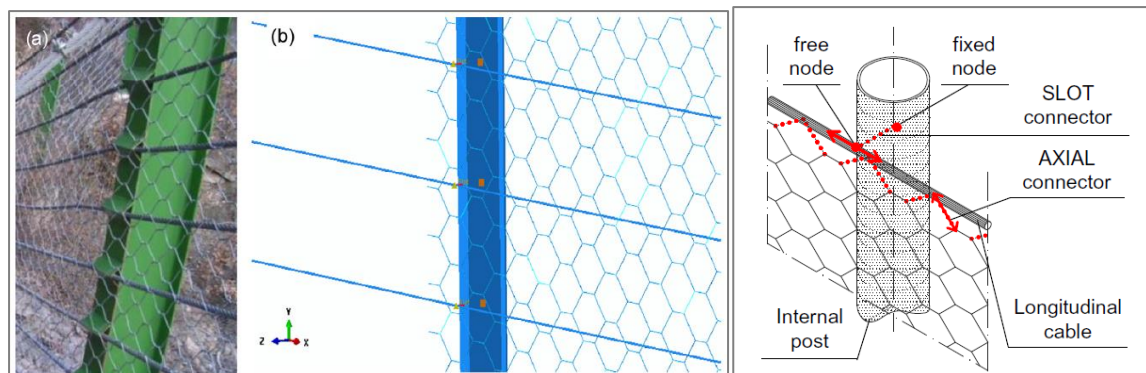


Figura 38. Conectores empleados en los modelos de pantallas de baja energía: a) tipo slot (De Miranda et al., 2015), y b) tipo slot y tipo axial (Mentani et al., 2016).

De forma opuesta a los anteriores, otros trabajos encontrados en la bibliografía tienen como objetivo representar las pantallas dinámicas lo más fidedignamente posible, reduciendo al mínimo las incertidumbres e imprecisiones que podrían causar las simplificaciones mencionadas en los párrafos anteriores. De este modo, en Escallón et al, 2013, Escallón et al., 2014, y Koo et al., 2016 la red de intercepción de anillos se implementa en el software introduciendo su geometría original, y añadiendo propiedades de interacción con fricción. Tanto las propiedades mecánicas de los anillos como el comportamiento de las interacciones se calibran empleando los ensayos experimentales que se detallan en los apartados 3.1 y 3.3.2. Al igual que ocurre en la realidad, los anillos del contorno se conectan con los cables perimetrales con grilletes, que permiten que se produzca un cierto deslizamiento de la red hacia el lugar del impacto del bloque. Esto es lo que se llama el “efecto cortina” (Figura 39).

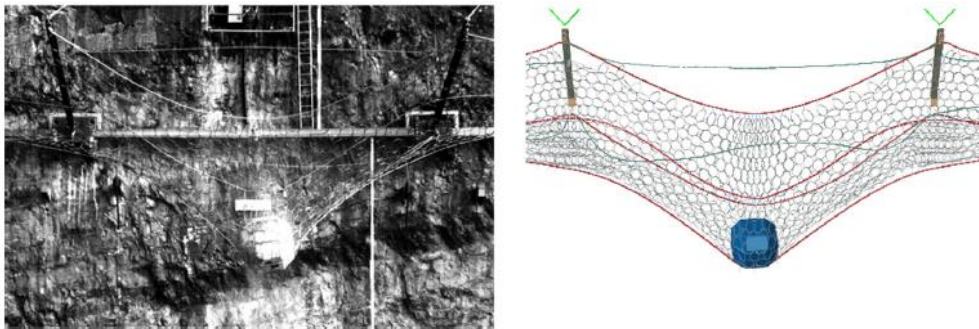


Figura 39. Modelo de pantalla dinámica según Escallón et al., 2014. Simulación de un ensayo tipo MEL sobre una pantalla RXE-1000 (1000 kJ) a los 500 ms del impacto, donde se observa el efecto cortina en la parte central del cable perimetral.

Koo et al., 2016, además de realizar la calibración del modelo de elementos finitos, también analizó el comportamiento de la pantalla ante impactos de diferente geometría, desde una esfera de 2 metros de diámetro hasta una losa formada por varias esferas unidas entre sí con unas dimensiones totales de 7mx4m. En el trabajo realizado por Escallón et al., 2015, como en los anteriores trabajos, se obtuvieron resultados numéricos con una muy buena aproximación a los obtenidos experimentalmente, esta vez con una modelización detallada de una pantalla cuya red de intercepción es una malla de alambre (Figura 21 a), que al igual que la red de anillos, requiere la introducción de propiedades de interacción entre los alambres de la retícula para su correcto funcionamiento. Todos los modelos mencionados suponen un mayor coste computacional que los del primer grupo, aunque se supone también una mayor precisión de resultados.

El MEF también fue la herramienta utilizada por Tran et al., 2013a para la creación de un prototipo de pantalla con una red de intercepción distinta a las vistas con anterioridad, formada por cables horizontales fijados a los postes extremos y pletinas de acero dispuestas verticalmente. Además, también dispone de una malla secundaria de retícula cuadrada. Tanto los cables como los disipadores de energía se simplificaron empleando leyes bilineales del material. El diseño se simuló empleando diferentes localizaciones para el impacto, tanto en el módulo central como en uno de los módulos laterales, de modo que fue posible estudiar su comportamiento en términos de capacidad energética, elongación máxima de la pantalla y deformación y momento de los postes. Con estos datos fue posible realizar una mejora del diseño inicial modificando las características de los frenos. Esta pantalla fue finalmente fabricada, ensayada experimentalmente y comparada con los modelos numéricos en Tran et al., 2013b.

Por último, deben ser también señalados los trabajos de Grassl et al., 2003, Volkwein A. 2004, que desarrollaron un programa propio de elementos finitos llamado FARO, especializado en la simulación de pantallas dinámicas. Las redes de anillos se simplifican de una forma diferente a las anteriormente descritas. Esta vez cada anillo está descrito por 8 nodos, de los cuales 4

corresponden a la unión del anillo con los 4 anexos, y los otros 4 nodos corresponden a nodos intermedios. Los 8 nodos se unen mediante barras rectas formando un polígono que tiende a un círculo.

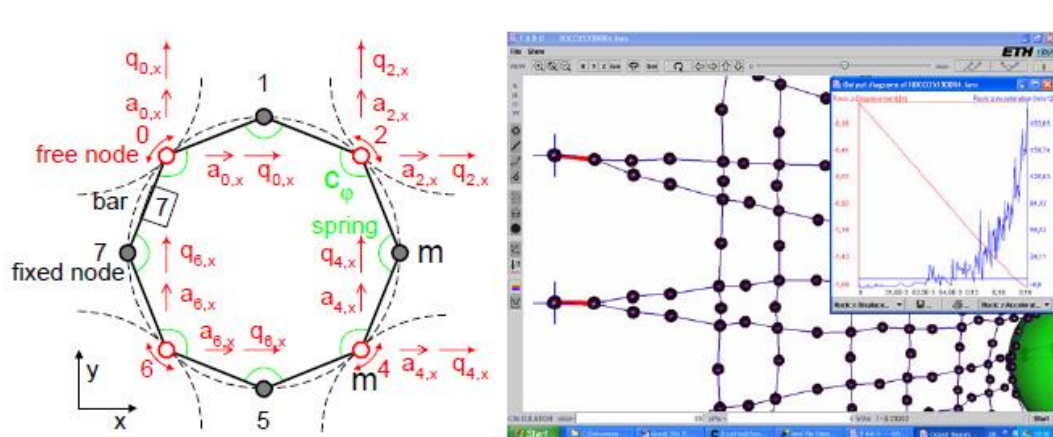


Figura 40. Modelo simplificado de red de anillos según Grassl et al., 2003 y GUI del software FARO.

La creación de un software ad-hoc permitió eliminar las herramientas y datos de salida innecesarios, simplificando la interfaz y reduciendo el tiempo computacional.

2.8 Metodologías de diseño de pantallas dinámicas

Tal y como ya se avanzó en la introducción de esta tesis, los trabajos que se dedican a plantear una metodología de diseño para pantallas dinámicas son prácticamente inexistentes.

Uno de los pocos autores que trabajó sobre este tema es Roberto Luis Fonseca (Tesis Fonseca), actual director de la empresa Geobrugg Ibérica, dedicado a la creación de sistemas de protección de taludes. En su tesis diseñó una de las primeras pantallas dinámicas que aparecieron en España, cuyo procedimiento (diseño mediante deformación a rotura) fue el siguiente:

- I. Obtención de resultados de laboratorio de carga a rotura a punzonamiento de la malla y de la deformación máxima a tracción en mm/m.
- II. El freno que se utilizó en su trabajo se compone de bandas de elastómeros que comprimen para incrementar la longitud de los cables. En este paso se decide el número de elastómeros y se obtiene la extensión que produce en el cable. Esta extensión se suma a la elongación propia de los cables al traccionarse por lo que se obtiene la elongación total de los cables perimetrales
- III. Se fija un ángulo de rotación límite para los postes

- IV. Se realiza un esquema de análisis de la pantalla en su posición límite, que permite el cálculo de fuerzas de acción y reacción, deformaciones, desplazamientos y rotación de los elementos de la pantalla.
- V. Obtenida la reacción en todos los elementos se vuelve al punto II y se ajustan los desplazamientos. Se modifica en caso de ser necesario el nº de elastómeros.
- VI. Se recalculan las reacciones y se dimensionan los elementos en función de dichas fuerzas.
- VII. El valor máximo de energía se calcula como la mitad de la carga de punzonamiento por el desplazamiento máximo de la pantalla.

Este procedimiento es puramente estático e iterativo, tomando inicialmente dimensiones de cables y de frenos que son comprobados a posteriori y corregidos en caso de superar los valores límite de fuerza.

Otro autor, Luis López Quijada, utilizó el siguiente procedimiento para el diseño de su pantalla dinámica:

- I. Análisis de los parámetros de impacto. Se trata de obtener el impulso que produce el impacto de un bloque sobre la pantalla. Para ello asume el desplazamiento de la red en el impacto, la velocidad de este y la energía que se obtiene para obtener la duración del impacto. Estos datos permiten obtener la carga máxima en el punto del impacto.
- II. Diseño mediante la deformación de rotura.
 - a. A diferencia del anterior autor, este no tiene en cuenta el incremento de longitud en los cables que puede provocar la extensión de los frenos.
 - b. Utiliza el diseño mediante deformación a rotura, obteniendo resultados de carga en los cables muy altos.
 - c. Utiliza la misma metodología partiendo desde el último punto hacia el principio; es decir, calcular la energía del impacto, luego la fuerza de choque y hacer que ésta recorra la pantalla mientras se van diseñando las partes. De esta forma se obtienen valores de cargas en los cables más coherentes.
- III. Diseño pseudo-dinámico por trayectorias de cargas. Se utiliza para determinar las fuerzas sobre cada componente individual. Es una metodología muy parecida a la de deformación de rotura, y la principal diferencia respecto al modelo anterior es que se tiene en cuenta el número de cuerdas efectivas de la red sobre las que impacta el bloque.
- IV. Diseño estático mediante elementos finitos. Se crea un modelo muy básico sin frenos en ninguno de los vientos. Además, la red y los cables perimetrales se unieron rígidamente entre sí, por lo que es inviable incentivar el deslizamiento de la red sobre los cables perimetrales, tal y como ocurre en la realidad. Tampoco se permite que los cables perimetrales deslicen respecto de los extremos de los postes. Los resultados obtenidos, por tanto, pueden considerarse muy conservadores.
- V. Diseño dinámico mediante elementos finitos. Al igual que en el caso anterior no se consideró la presencia de frenos ni fricciones y/o deslizamientos entre cables y postes.

Solo se utilizó para comprobar la secuencia de funcionamiento de cada uno de los componentes de la pantalla.

Recientemente se ha desarrollado un trabajo (Xu et al., 2018) en el que se establece un método de selección de componentes de una pantalla basado en el porcentaje de absorción de energía de cada componente. El proceso es el siguiente:

1. Cálculos previos

- a) Simulación de una pantalla dinámica (1500 kJ) ya ensayada experimentalmente. Este paso sirve para validar los resultados que se obtendrán en simulaciones posteriores.
- b) Obtención de la energía de la red de anillos en pantallas con distinta energía nominal. La energía absorbida por la red en cada caso se define en función de la energía nominal del impacto que recibe. Así se obtiene una representación gráfica y formulación que relaciona inequívocamente ambos términos.
- c) Obtención de la energía absorbida por los disipadores. De igual manera, se crea una gráfica en la que se relaciona el valor de energía absorbida y la energía de impacto aplicada a la pantalla, y se crea una fórmula que permite obtener la energía que se supone es absorbida por todos los disipadores ubicados en un mismo cable.
- d) Predicción de las fuerzas internas en los cables. Se crea una expresión para la fuerza de diseño en los cables que incluye un coeficiente que tiene en cuenta la asimetría del impacto y otro que tiene en cuenta la reducción de resistencia debido a la flexión del cable.

2. Diseño de una pantalla dinámica en función de la energía objetivo.

- a) Selección de la red de anillos en función de los resultados de 1b.
- b) Evaluación de la energía que disipará la red de anillos según 1b.
- c) Evaluación de la energía que disiparán los frenos según 1c
- d) Selección del número de frenos según 1c
- e) Selección de los cables de acero según 1d.
- f)

2.9 Conclusiones y decisiones iniciales

Tras el repaso realizado a toda la información encontrada relacionada con la configuración y partes de las pantallas, ensayos experimentales y simulaciones numéricas, se extraen una serie de conclusiones que constituirán la base a partir de la cual se desarrollará el trabajo de esta tesis doctoral.

A continuación, se exponen dichas conclusiones punto por punto:

- Aspectos mejorables del estado del arte

Se ha observado que existen frenos que presentan curvas de comportamiento irregulares; es decir, si se toman 3 frenos iguales y se les realizan sendos ensayos de tracción, las curvas de comportamiento resultantes son diferentes (Tesis Luis López Quijada, 2007). Esta irregularidad ocurre especialmente en los frenos cuyo mecanismo principal de disipación de energía es la fricción, y es debido a que en este tipo de frenos existen ciertos elementos que fuerza la fricción entre componentes cuyo apriete puede no hacerse de forma automatizada sino manual. Incluso en caso de aplicarse el apriete de forma automatizada, estos sistemas de frenado son muy sensibles a la posición de los dos componentes que se colocan para que ejerzan rozamiento entre sí y sean capaces de disipar energía. Además de este comportamiento irregular en los frenos por fricción, algunos frenos que funcionan por deformación también pueden presentar discrepancias en su comportamiento, sobre todo en lo que a la fuerza de activación se refiere. Por ejemplo, en el freno de la Figura 13d podría producirse una forma de pandeo inesperado (Trad 2011). Por ello, se plantea la necesidad de crear un nuevo disipador que elimine estas incertidumbres y que presente una curva de comportamiento Fuerza-Desplazamiento regular e independiente al proceso de fabricación y/o montaje del mismo.

Tal y como se adelantó en la introducción, existen muy pocas muestras de dimensionamiento de las pantallas en la literatura. En todas las metodologías se encuentran inconvenientes o puntos negativos que se valoran a continuación.

Las tesis de Roberto Fonseca y Luis López utilizan cálculos analíticos estáticos y suposiciones geométricas del estado de flecha máxima que aportan resultados demasiado conservadores. Esta afirmación no es arbitraria, sino que se ha demostrado mediante el trabajo de Castanon-Jano et al. (2018), donde se observa que la pantalla de 150 kJ diseñada por Luis López Quijada se encuentra sobredimensionada, por lo que es posible la eliminación de todos los frenos ubicados en los vientos superiores y la pantalla seguiría siendo capaz de capturar una roca con una energía de impacto de 150 kJ.

En cuanto al método propuesto por Xu et al, 2018 basado en la distribución de la absorción de energía entre cada uno de los componentes, plantea el inconveniente de que el tipo de membrana (red de anillos), de disipador de energía (de anillo) y los postes son elegidos de antemano a partir de una pantalla de referencia, por lo que no se considera un método de diseño generalizado a cualquier pantalla con cualquier tipo de componente. En consecuencia, si se decidiese que, por ejemplo, la membrana tuviese otra geometría, digamos de retícula cuadrada, sería necesario realizar el estudio de nuevo desde el principio, puesto que el porcentaje de energía absorbido en un sistema de pantalla dinámica varía en relación a la geometría, movilidad y capacidad de absorción de sus

componentes. Por otra parte, el pico de fuerza que se obtiene en los vientos superiores depende en gran medida del punto de anclaje de estos. No será lo mismo anclar dichos vientos a una altura de 8 metros respecto a la posición de la propia barrera que hacerlo a 15 metros. El impacto de un bloque sobre la membrana de la pantalla provocará una reacción vertical y en sentido contrario sobre los vientos superiores, y la fuerza sobre ellos dependerá directamente del ángulo que formen con la vertical. Podría pensarse en que la solución a esto sería anclar los vientos a la misma distancia que la utilizada en el proceso de diseño, pero esto no siempre es posible debido a que el terreno puede presentar zonas donde se haga imposible instalar un anclaje.

En ninguno de los métodos encontrados en la literatura se plantea el Diseño de Experimentos (DOE) para conseguir un dimensionamiento óptimo. Por tanto, este método será el propuesto para su utilización en esta tesis.

- Ensayos experimentales

Se ha visto en el estado del arte que las membranas se pueden ensayar estática y dinámicamente. Con el objetivo de obtener la carga de rotura de las membranas se descartan los ensayos dinámicos, puesto que sería necesario realizar múltiples ensayos de impacto sobre un tipo de membrana para llegar a obtener un límite de energía a partir del cual la muestra rompería. Además, no se obtendrían un registro de fuerza sino el dato de energía aplicada inicialmente por el cual rompe. Para la implementación de un modelo que reproduzca fielmente el comportamiento de una membrana se considera fundamental que sea capaz de reproducir la curva carga desplazamiento y que el punto de rotura no se aleje más del 15% del punto real obtenido en el ensayo experimental.

Adicionalmente, los ensayos estáticos se pueden dividir en ensayos de tracción, ensayos de punzonamiento y ensayos de carga distribuida. En este trabajo se ha considerado que los ensayos que mejor reproducen la situación real de impacto son el ensayo de punzonado (atendiendo a la forma de la membrana en el lugar del impacto) y el ensayo de tracción (si se considera el estiramiento de la membrana en los paños adyacentes al impacto). Por tanto, se realizarán ensayos experimentales de estos dos tipos y se tratarán de reproducir numéricamente. Los ensayos de carga distribuida se consideran más adecuados cuando se trata de reproducir el comportamiento de una membrana flexible anclada al terreno, por lo que no se tiene en cuenta en este trabajo.

En cuanto a los frenos se consideran igualmente importantes los ensayos estáticos y los dinámicos. Los ensayos dinámicos aportarán información del comportamiento de los frenos en casos de aplicación de la carga reales; es decir, a muy alta velocidad. Entre los

tipos de ensayos dinámicos descritos en el estado del arte (2.4.6.1) se elegirá el tipo II. En lugar de realizar los ensayos al aire libre como se ha visto que se hace para esta tipología de ensayo, se realizará un ensayo a escala aprovechando una estructura en forma de pórtico disponible en el laboratorio de estructuras de la Universidad de Cantabria, y se ensayarán frenos a escalas debido a la limitación de altura y resistencia de dicho pórtico.

Los ensayos estáticos aportarán información fundamental en relación con la energía absorbida gracias a los registros continuos de fuerza ejercida por la máquina y desplazamiento en el tiempo. Por tanto, se realizarán ensayos estáticos tanto a un freno a escala como a los componentes de cada freno, averiguando de esta manera la proporción de energía por deformación absorbida por cada componente y la energía por fricción de estos. Esta última energía se obtendrá por la diferencia entre la energía obtenida del ensayo del freno total a escala y la energía de deformación de todos y cada uno de sus componentes.

- Instrumentación

La instrumentación utilizada en los ensayos experimentales es la siguiente:

Ensayos estáticos a los frenos:

- Medida de compresión del conjunto formado por los tubos: se emplean dos medidores de hilo que se encuentran fijados en ambos laterales de una de las placas exteriores y que cuyos hilos se encuentran inicialmente extendidos y fijados mediante una argolla a la placa del otro extremo. El empleo de dos medidores de hilo en el mismo freno (en lugar de solamente uno) se considera necesario debido a que la excentricidad de la carga en el freno podría hacer que se comprimiese más por uno de los laterales que por otro. Utilizando 2 medidores de hilo es posible realizar la media entre los dos valores extraídos obteniendo así una medida más fiable.
- Medida de extensión del freno completo: se empleará el sensor de la máquina de tracción para la obtención de dicha medida
- Medida de la carga aplicada al freno: se extraerá de la célula de carga de la que dispone la máquina para controlar la aplicación de la carga al elemento de ensayo.

Ensayos dinámicos a los frenos:

- Medida de compresión del conjunto formado por los tubos: se emplean dos medidores de hilo que se encuentran fijados en ambos laterales de una de las placas exteriores y que cuyos hilos se encuentran inicialmente extendidos y fijados mediante una argolla a la placa del otro extremo.

- Medida de extensión del freno completo: se empleará el sensor de la máquina de tracción para la obtención de dicha medida.
- Medida de la carga aplicada al freno provocada por la caída de la masa: se utilizará un sensor de fuerza como el descrito en el apartado 2.6.1.

Ensayos estáticos de tracción en las membranas:

- Medida de la flecha de la membrana: se empleó un medidor de hilo de 1250 mm de carrera.
- Medida de la carga aplicada: se empleó una célula de carga de 45359,2 kp de capacidad.

Ensayos estáticos de punzonamiento en las membranas:

- Medida de la flecha de la membrana: se emplean uno o varios medidores de hilo ubicados en distintas posiciones de la planchuela de punzonado.
- Medida de la carga aplicada: se obtiene a partir de una célula de carga acoplada a un cilindro hidráulico.

Ensayos dinámicos sobre las pantallas completas:

- Medida de la flecha de la pantalla: se utilizan cámaras de alta velocidad para obtener la máxima elongación y medición manual mediante cinta métrica para la obtención de la altura residual.
- Medida de la fuerza en los cables: se utilizarán sensores de cable como los descritos en 2.6.1, que aportan la ventaja de evitar cortar los cables para su instalación, como ocurre con las células de carga.
- Medida de la tensión en los alambres: el pegado de dos galgas extensométricas bidireccionales conectadas a un mismo canal en un puente completo de Wheatstone se vislumbra como la mejor opción para la obtención de una tensión media que tiene en cuenta la curvatura de los alambres a los que se adhieren. En cada punto de medición, se coloca una banda en la generatriz superior del alambre y otra banda en la generatriz inferior, con el objetivo de medir deformaciones axiales en la dirección del eje del alambre en su fibra neutra.
- Medida de tensión en los bulones: se decide emplear varias técnicas, pues la obtención de estas medidas no se encuentra desarrollada o indicada en la literatura. Las dos opciones son el uso de una célula de carga fabricada ad hoc para su atornillado en el bulón a medir, el pegado directo de galgas extensométricas en la parte superior e inferior, quedando conectadas a 2 canales independientes, cada una de ellas con la configuración en medio puente de Wheatstone.

- Simulaciones numéricas

Se dispone de dos softwares, Ansys y Abaqus, y ambos utilizan el método de elementos finitos para la resolución de los modelos. Tal y como se ha demostrado en el apartado 2.7.4, este método de resolución MEF resulta adecuado y ya ha sido empleado en otros trabajos que incluyen pantallas dinámicas. Pese a la idea inicial de la utilización de Ansys para todos los cálculos, se comprueba que el manejo de la gran cantidad de componentes de los que dispone una pantalla es mucho más sencillo empleando el software Abaqus. Además del ahorro del tiempo en la geometría y colocación de los componentes, Abaqus dispone de conectores de varios tipos, entre ellos los axiales, que facilitan la inclusión simplificada de los frenos como se verá en siguientes apartados. Por último, se comprueba que en Abaqus el coste computacional en simulaciones dinámicas es menor, y que los resultados pueden visualizarse a medida que se van generando, no siendo necesario esperar a la finalización del cálculo completo para realizar comprobaciones de rotura de la pantalla, lo que permite finalizar una simulación si se detectan errores para realizar las correspondientes modificaciones. Esto resultará muy útil en los apartados como el DOE (capítulo 5) en los que sea necesario iterar modificando la energía aplicada al modelo para comprobar el instante de rotura. Por todo ello se concluye que las simulaciones numéricas en las que se pretenda reproducir el impacto sobre pantallas dinámicas se empleará el software Abaqus.

Para simular las placas de anclaje y los postes y realizar la selección de la geometría más apropiada podrían utilizarse ambos softwares indistintamente, puesto que se trata de simulaciones estáticas en las que el modelo consta de un único componente cuya geometría se genera en un programa CAD (en este caso SolidWorks) y se importa al software MEF para realizar la discretización en elementos finitos, aplicar las cargas y condiciones de contorno y asignarle un material determinado. Con el fin de adquirir conocimientos de más de un software MEF se decide emplear en este caso Ansys.

Igualmente se emplea Ansys para la simulación de los frenos. En este caso habrá varios componentes que forman el freno (en torno a 5-7 componentes), pero en los que no habrá dificultad en implementar sus contactos y realizar su discretización. Para obtener la energía capaz de absorber un freno de forma precisa se realizarán, al igual que en los ensayos experimentales, simulaciones estáticas en las que fácilmente se podrá medir la reacción (en kN) y la extensión del freno (en m) para obtener la energía mediante la integración de la gráfica carga-desplazamiento a partir de los anteriores datos.

3 Estudio de las membranas

3.1 Introducción

En el capítulo anterior se describieron brevemente las numerosas opciones en cuanto a membranas (redes de cables, de anillos, malla de alambre, etc.) formando parte de la estructura de intercepción definida por la ETAG027 como la parte que soporta el impacto directo de la roca.

Debido a la ausencia de una normativa para el ensayo experimental de las membranas, y a que la guía ETAG027 sí exige el ensayo de las membranas, pero no define con concreción el tipo de ensayo aludiendo al gran número de membranas de distinto tipo, es muy complicado realizar un análisis comparativo para determinar cuál es la mejor solución. Mientras que algunos fabricantes optan por la realización de ensayos de tracción, otros prefieren servirse de ensayos de punzonamiento. Por otra parte, las dimensiones de los paños de membrana a ensayar también son muy diversos, yendo desde 1 solo anillo, pasando por paños cuadrados de 1x1 m hasta llegar a dimensiones de 3x2.5 m. Por último, también es conocida la existencia de variaciones en la carga máxima en relación al tamaño de la placa o artilugio a partir del cual se aplica la carga de punzonado.

A continuación, se muestran dos tablas (Tabla 8 y Tabla 9) con todos los resultados encontrados en la literatura que definen la carga de rotura de las membranas.

En los ensayos de tracción se mostrará la resistencia en kN por metro de membrana, puesto que es la medida que comúnmente se encuentra en los datos técnicos que ofrecen los fabricantes. Además, se obtiene la resistencia por unidad de masa de la membrana. En el caso de los ensayos de punzonamiento se decide presentar la resistencia de las membranas por metro cuadrado, así como su resistencia por masa de material (en el caso en el que se tengan datos del material de la membrana).

Los valores de las tablas señalados en rojo se han obtenido a partir de estimaciones de geometría, extrapolaciones de peso o ambas cosas simultáneamente. Para la red GTS no se han encontrado

datos del tipo de red de cable utilizado, por lo que se extraen datos de peso de cables de diámetro 6 y 12 mm de cable de tipo 7x19 para la obtención de la resistencia por unidad de masa.

Tabla 8. Resultados de los ensayos de punzonamiento encontrados en la literatura.

| Tipo de red | Dimensiones paño | Tamaño retícula/ diámetro anillo | ϕ cable o alambre (mm) | Carga máx. (kN) | Masa (kg/m ²) | Masa total paño (kg) | Resistencia/masa (kN/kg) | Resistencia/area (kN/m ²) | Calidad acero (MPa) | Fuente |
|------------------------|------------------|----------------------------------|-----------------------------|-----------------|---------------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------|--|
| Red de anillos (Rocco) | 2,8x2,8 m | 5 vueltas ϕ 300 | 3 | 270 | 3,7 | 29,01 | 9,31 | 34,44 | 1770 | Yu et al., 2018 |
| Red de anillos (Rocco) | 2,8x2,8 m | 7 vueltas ϕ 300 | 3 | 309 | 5,2 | 40,77 | 7,58 | 39,41 | 1770 | Yu et al., 2018 |
| Red de anillos (Rocco) | 2,8x2,8 m | 9 vueltas ϕ 300 | 3 | 550 | 6,5 | 50,96 | 10,79 | 70,15 | 1770 | Yu et al., 2018 |
| Red de anillos (Rocco) | 2,8x2,8 m | 12 vueltas ϕ 300 | 3 | 725 | 8,7 | 68,21 | 10,63 | 92,47 | 1770 | Yu et al., 2018 |
| Red de anillos (Rocco) | 2,8x2,8 m | 16 vueltas ϕ 300 | 3 | 990 | 11,4 | 89,38 | 11,08 | 126,28 | 1770 | Yu et al., 2018 |
| Red de anillos (Rocco) | 2,8x2,8 m | 19 vueltas ϕ 300 | 3 | 1300 | 13,5 | 105,84 | 12,28 | 165,82 | 1770 | Yu et al., 2018 |
| Red de anillos | 5x5 anillos | ϕ 420 mm | | 790 | | | | | | Gentilini et al., 2012 |
| Red GTS | 2x2 m | Largo X ancho= 315x175 mm | 6 | 125 | | 10,34 | 12,09 | 31,25 | 1770 | Bertrand et al., 2012 |
| Tecco G65/3 | 0,9x0,9 m | Diagonales rombo: 83x143 mm | 3 | 67,34 | 1,65 | 1,3365 | 50,39 | 62,20 | 1770 | Castro Fresno, D. 2000. Tesis doctoral |
| Tecco G65/4 | 0,9x0,9 m | Diagonales rombo: 83x138 mm | 4 | 107,41 | 3,3 | 2,673 | 40,18 | 49,61 | 1770 | Castro Fresno, D. 2000. Tesis doctoral |
| Red de cable cuadrada | 2x2 m | Lados Cuadrado: 283x283 mm | 8 | 95 | 2,75 | 11 | 8,64 | 23,75 | 1770 | Castro-Fresno et al., 2009 |
| Red de cable cuadrada | 2x2 m | Lados Cuadrado: 250x250 mm | 8 | 114 | 3,11 | 12,44 | 9,16 | 28,50 | 1770 | Castro-Fresno et al., 2009 |
| Red de cable cuadrada | 2x2 m | Lados Cuadrado: 200x200 mm | 8 | 136 | 3,8 | 15,2 | 8,95 | 34,00 | 1770 | Castro-Fresno et al., 2009 |

Tabla 9. Resultados de los ensayos de tracción encontrados en la literatura.

| Tipo de red | Dimensiones paño | Tamaño retícula /diámetro anillo | ϕ cable o alambre (mm) | Carga máx (kN) | Masa (kg/m ²) | Resistencia /masa (kN/kg) | Resistencia /longitud (kN/m) | Calidad acero (MPa) | Fuente |
|----------------------------|------------------|----------------------------------|-----------------------------|----------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------|--|
| Red de anillos | 3,04x2,59 m | 6 vueltas ϕ 350 mm | 4 | 1400 | | | 540,54 | | Gentilini et al., 2013 |
| Red de anillos (3SRINGNET) | 1 m | 7 vueltas ϕ 350 | 2 | | 1,6 | 66,25 | 106 | | www.3sgeotech.com/es/ |
| Red de anillos (3SRINGNET) | 1 m | 7 vueltas ϕ 350 | 3 | | 3,52 | 68,18 | 240 | | www.3sgeotech.com/es/ |
| Red de anillos (3SRINGNET) | 1 m | 7 vueltas ϕ 350 | 4 | | 6,32 | 67,56 | 427 | | www.3sgeotech.com/es/ |
| Red de anillos (3SRINGNET) | 1 m | 19 vueltas ϕ 350 | 3 | | 9,68 | 67,36 | 652 | | www.3sgeotech.com/es/ |
| Red de anillos (3SRINGNET) | 1 m | 19 vueltas ϕ 420 | 4 | | 12,95 | 74,67 | 967 | | www.3sgeotech.com/es/ |
| Red GTS | 1,050x0,65m | Largoxancho= 630x350 mm | 12 | 360 | | 119 | 342,85 | 1770 | Bertrand et al., 2012 |
| Tecco G65/3 | 1x1 m | Diagonales rombo: 83x143 mm | 3 | | 1,65 | 78,79 | 130,00 | 1770 | Mentani et al., 2017 |
| Tecco G65/3 | 1x1 m | Diagonales rombo: 83x143 mm | 3 | | 1,65 | 91,76 | 151,46 | 1770 | Castro Fresno, D. 2000. Tesis doctoral |
| Tecco G65/4 | 1x1 m | Diagonales rombo: 83x138 mm | 4 | | 3,3 | 78,08 | 257,65 | 1770 | Castro Fresno, D. 2000. Tesis doctoral |
| Spider | 1,1x0,9 m | Diagonales rombo: 0,3x0,15 m | 8,6 | 350 | 5 | 70,71 | 353,54 | 1770 | Escallon et al., 2015 |
| Red Omega | | $\phi_{arco} = 100$ mm | 4,5 | | 2,7 | 57,04 | 154 | 1770 | www.trumer.ca |
| Red Omega | | $\phi_{arco} = 130$ mm | 6 | | 3,6 | 68,33 | 246 | 1770 | www.trumer.ca |
| Red Omega | | $\phi_{arco} = 130$ mm | 7,5 | | 5,6 | 68,93 | 386 | 1770 | www.trumer.ca |
| Red Omega | | $\phi_{arco} = 200$ mm | 7,5 | | 4,2 | 68,33 | 287 | 1770 | www.trumer.ca |
| Red Omega | | $\phi_{arco} = 185$ mm | 9 | | 6,8 | 68,38 | 465 | 1770 | www.trumer.ca |
| Red Omega | | $\phi_{arco} = 185$ mm | 10,5 | | 10,5 | 72,00 | 756 | 1770 | www.trumer.ca |

Hasta el momento la membrana que consigue una mayor resistencia mediante la combinación de resultados en tracción y punzonamiento es la red de anillos. Dentro de este tipo de membranas existe variabilidad en el diámetro los anillos y en el número de alambres por anillo (Tabla 8 y Tabla 9), pero se tiene constancia que este tipo de red puede llegar a resistir cargas de punzonado de hasta 165 kN/m^2 (Yu et al., 2018). La calidad del acero de los alambres que conforman esta red de anillos es de 1770 MPa y emplean 19 vueltas de alambre por anillo, lo que supone una masa de $13,5 \text{ Kg/m}^2$ y por tanto una resistencia a punzonamiento en relación a su masa de $12,3 \text{ kN/kg}$. En tracción, la red de anillos también es la que mayores cargas resiste, alcanzando los 967 kN/m . Viendo el buen funcionamiento de la red de anillos, otros autores trataron de crear membranas con geometrías curvas, intentando así llegar a igualar el comportamiento de las primeras, apareciendo la red GTS o la red Omega. Sin embargo, de la red GTS se conoce que puede alcanzar una carga de punzonamiento de hasta 125 kN (un orden de magnitud menor que la red de anillos), en un bastidor de 2×2 metros; es decir, $31,25 \text{ kN/m}^2$, una quinta parte del resultado obtenido para la red de anillos. En tracción se tendría una resistencia de $342,85 \text{ kN/m}$, un tercio del valor máximo en las redes de anillo. De la red Omega no existen datos de carga de punzonamiento, pero sí se tienen datos de ensayos de tracción, obteniéndose una resistencia máxima de 756 kN/m al utilizar cable de $10,5 \text{ mm}$ de diámetro. Este dato supera ampliamente los resultados de tracción de la red GTS disponible en la bibliografía, pero no a las redes de anillos.

Aunque se ha comprobado que ninguna de las membranas supera a la red de anillos en carga máxima resistida, aunque algunas sí lo hacen en su relación resistencia/masa, como ocurre en el caso de la malla de alambre TECCO en sus dos variaciones G65/3 y G65/4, tanto en cargas de punzonamiento ($91,76 \text{ kN/kg}$) como en tracción ($40,18 \text{ kN/kg}$). Pese a ofrecer una resistencia por unidad de masa óptima, la malla Tecco no posee tan alta resistencia en relación a sus dimensiones, alcanzando $257,65 \text{ kN/m}$ en tracción y $49,61 \text{ kN/m}^2$ en punzonado, valores mucho menores que los 967 kN/m en tracción y $15,82 \text{ kN/m}^2$ en punzonamiento para la red de anillos. Lo mismo ocurre con los resultados de la red de cable GTS en tracción, que presentan una relación resistencia/masa de 119 kN/kg , el mayor valor de todos los encontrados en la literatura, pero en relación a su área se obtiene una resistencia de 343 kN/m^2 , inferior a la red de anillos.

Sin embargo, en esta tesis se pretende crear una pantalla de baja-media energía, por lo que no son necesarias resistencias tan altas de las redes. Además, la intención es encontrar una red nueva, que no se haya utilizado hasta el momento, con una resistencia que posibilite el diseño de la pantalla. Por ello, las redes de intercepción que en esta tesis se proponen no han sido nunca utilizadas para este fin.

3.2 Descripción general de las alternativas

La red de cable triangular se vislumbra como una posible solución. Este tipo de red no existe en el mercado; ha sido diseñado por GITECO y está siendo actualmente analizada para su puesta en práctica como membranas flexibles en sistemas de protección de taludes. El diseño de la red se realiza a partir de la red de cable cuadrada de 200x200, ampliamente extendida en este ámbito. A partir de ella, se añade un cable que divide cada uno de los cuadros en dos diagonalmente, obteniéndose una retícula formada por triángulos isósceles idénticos, cuyos lados menores tienen una longitud de 200 mm y cuyo lado mayor es de 282,84 mm. En cada uno de los vértices de la red se inserta una grapa (Figura 41), para evitar el deslizamiento relativo entre los cables. Para un correcto grapado de la red se establece que el diámetro óptimo de los cables sea de 6mm, siendo estos de tipo 7x19. Un diámetro mayor de los cables supone una superposición de 3 cables que no cabrían dentro de la grapa, o en el caso de caber, no se aseguraría el que estos no deslizaran o rompieran por el debilitamiento en los alambres por el aplastamiento que sufrirían en la instalación de las grapas.

El patrón de la red estudiada se puede observar en la Figura 41. La curva tensión-deformación del cable de 6 mm se ha obtenido mediante un ensayo de tracción directa según lo especificado en el apartado 2.4.1, resultando una resistencia máxima de 26 kN para una deformación de entre el 2,3 y el 2,8% (Figura 42).

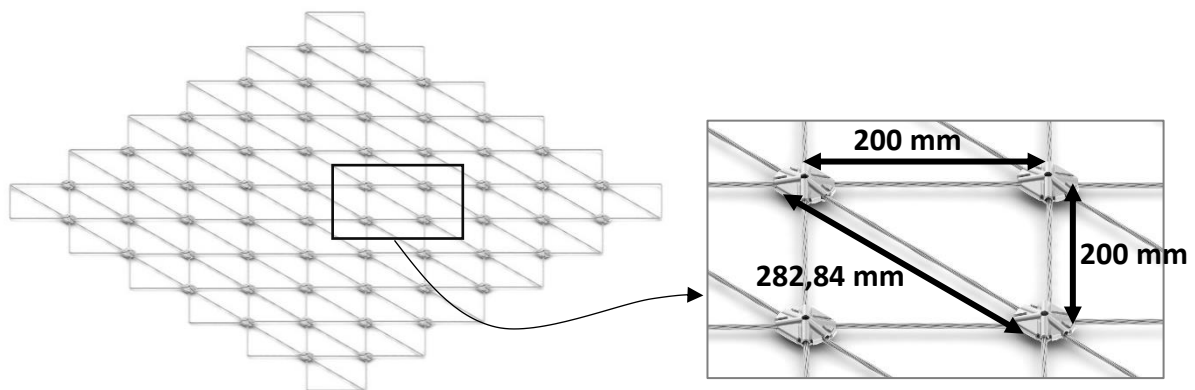


Figura 41. Red triangular

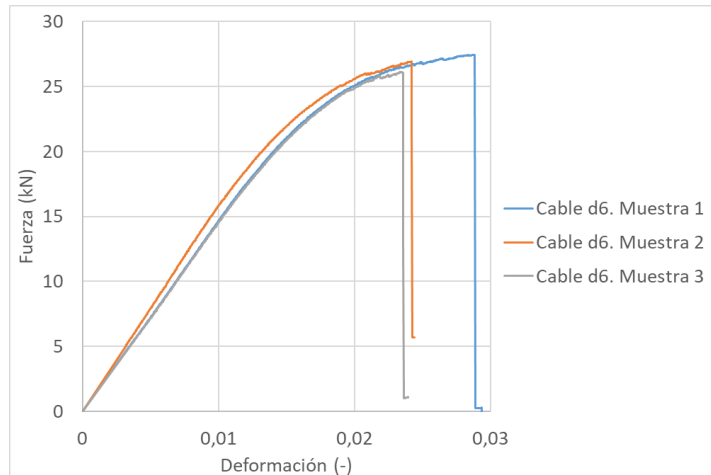


Figura 42. Curvas Carga-Deformación correspondientes a tres ensayos de tracción sobre el cable de diámetro 6 mm

La otra opción de membrana que se plantea es la malla de alambre MT15000, producto que la empresa INCHALAM (de donde surge el proyecto) comercializa desde hace años y que en la actualidad se destina principalmente a control de desprendimientos en taludes de mayor demanda. La fabricación de la malla se realiza con alambre de acero de alto desempeño estructural recubierto de aleación Bezinal (Zn/Al 90/10), lo que garantiza una alta resistencia a la corrosión incluso en ambientes agresivos. La resistencia a tracción de los alambres, tal y como se puede observar en la Figura 44 es de entre 13 y 14 kN (lo que equivaldría a una tensión de entre 882 y 898 MPa) con una deformación media del 8.8%.

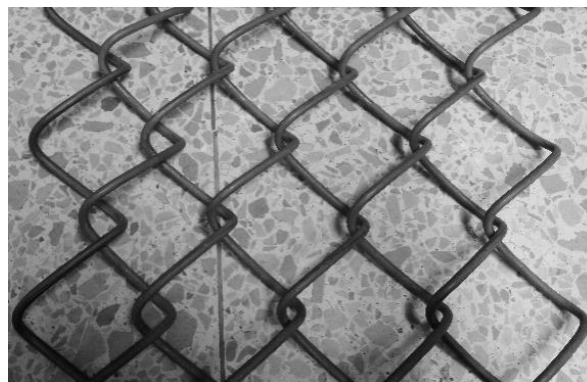


Figura 43. Fotografía tomada a una porción de malla MT15000

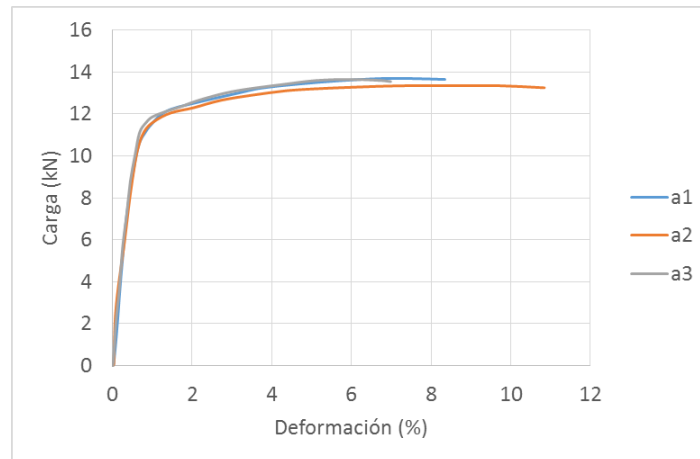


Figura 44. Curvas Carga-Deformación correspondientes a tres ensayos de tracción sobre el alambre que forma la malla MT15000

Para una completa caracterización de la malla, fueron necesarios los datos de carga y desplazamiento provenientes de ensayos de tracción lateral y de punzonado (Figura 45). Estos ensayos fueron realizados en las instalaciones de Inchalam en el año 2012. El tamaño de malla ensayado en tracción lateral es de 1m x 1m. En este ensayo, uno de los laterales tiene restringido el movimiento en las tres direcciones, mientras que en el lateral opuesto se impone un desplazamiento en sentido longitudinal (eje y positivo). Por otra parte, el ensayo de punzonado se obtiene a partir de una malla de 1,8m x 1,8 m que se fija en todo su contorno ($U_x=U_y=U_z=0$), y se aplica una carga en el centro mediante una placa circular de diámetro 600 mm.



Figura 45. Ensayo sobre la malla de alambre MT15000 a) tracción lateral, y b) punzonado con placa circular.

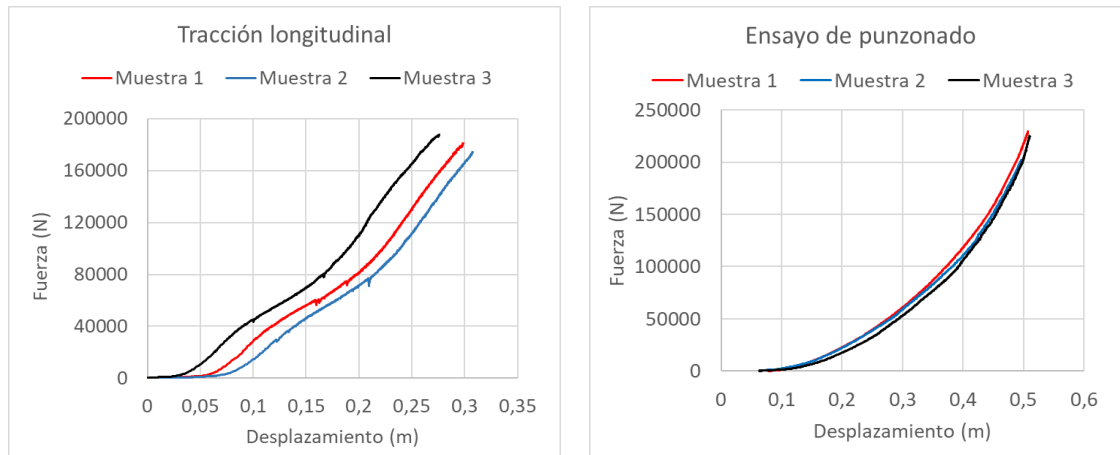


Figura 46. Gráficas Fuerza-Desplazamiento resultantes de los ensayos a la malla de alambre MT15000 a) tracción lateral, y b) punzonado con placa circular.

3.3 Simulación numérica y calibración de las alternativas

3.3.1 Redes de cable triangulares

No existen ensayos experimentales de este tipo de membrana. Los modelos numéricos creados para reproducir el comportamiento de las redes triangulares se realizan a partir de elementos unidimensionales sin rigidez a flexión, de manera similar a los modelos de red de cable cuadrada mostrados y calibrados en los trabajos realizados por Gentilini et al., 2012 y Castro-Fresno et al., 2008. El material tendrá una ley tensión-deformación elastoplástica multilínea, cuyos parámetros se obtienen siguiendo los pasos del esquema de la Figura 47. A partir de la curva carga-deformación del cable y con el área equivalente (que en este caso es de 15 mm^2) se obtiene la curva tensión-deformación, que debe ser transformada a tensión-deformación verdaderas para su utilización en el módulo explícito del programa de elementos finitos. Se determina el módulo elástico como la pendiente de la zona lineal de la curva. Se seleccionan entre 7 y 9 puntos de la zona plástica y se aplica un modelo de daño dúctil que permita la ruptura del elemento cuando este llegue a su deformación plástica máxima.

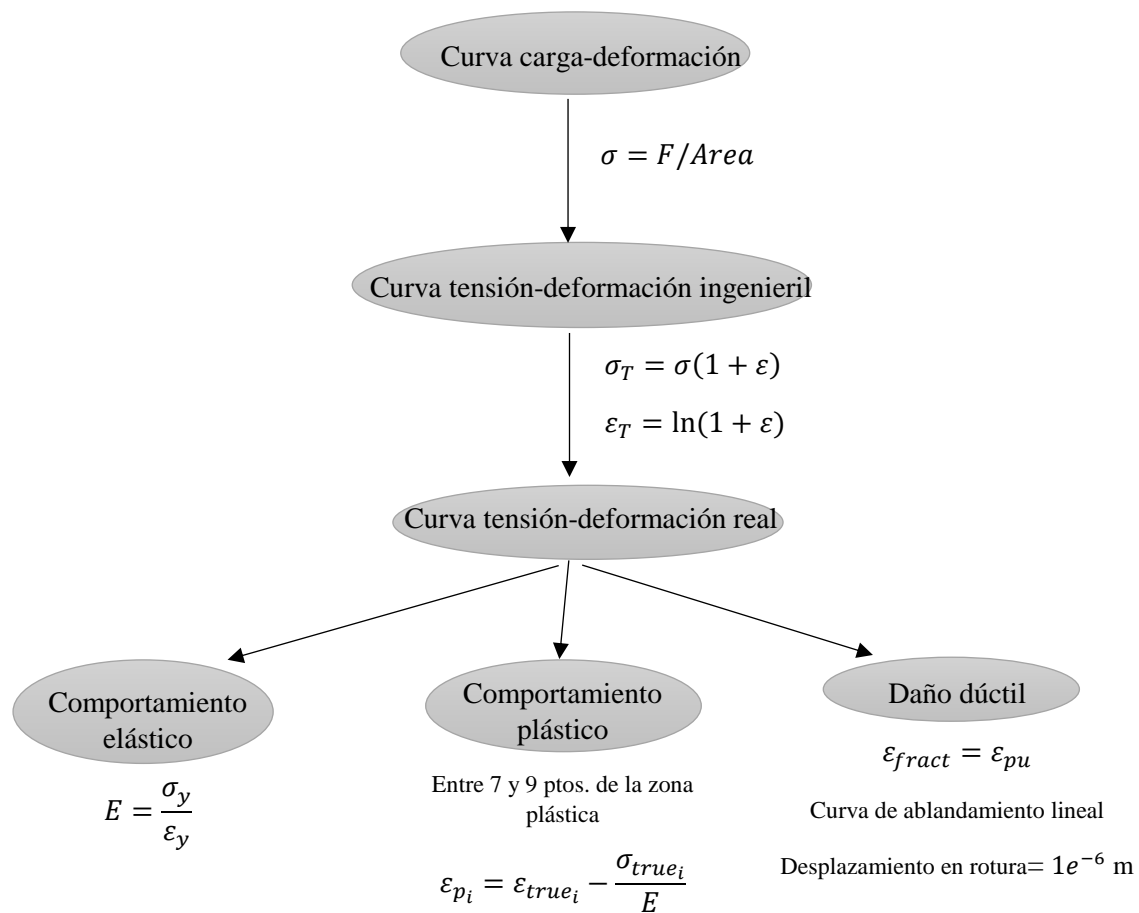


Figura 47. Esquema que describe la obtención de los parámetros de los cables.

3.3.2 Malla de alambre MT15000

3.3.2.1 Tipo Shell

La primera aproximación pretendía la máxima simplificación posible de la malla de alambre. Para ello se empleó una membrana continua (elementos tipo Shell). Se simularon ensayos de punzonado y de tracción lateral, obteniéndose resultados muy cercanos a los reales. Sin embargo, no se continuó con este tipo de modelización continua de la malla debido a la dificultad de incluirla en una pantalla dinámica completa, especialmente debido al cambio de las restricciones de contorno. Mientras que en los ensayos de punzonado los laterales de la malla permanecen inmóviles ($U_1=U_2=U_3=0$), en una pantalla dinámica el contorno de la malla debe deslizar a lo largo de los cables perimetrales. Esto se consigue mediante la adición de grilletes fijados a la malla continua cada 0,2 m, que sean capaces de deslizar a lo largo de los cables perimetrales. Sin embargo, aparecen tensiones máximas mayores a la de rotura del elemento en las inmediaciones

de dichos grilletes que no corresponden con la realidad, por lo que se decide descartar esta aproximación.

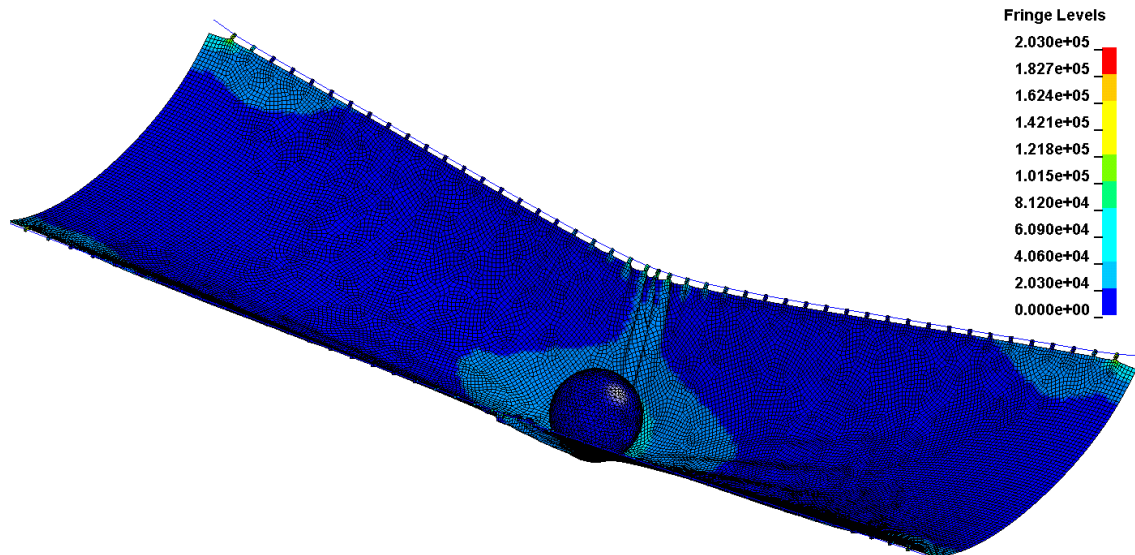


Figura 48. Esquema que describe la obtención de los parámetros de los cables.

Esta aproximación se realizó en la primera fase del proyecto, y se utilizó software Ansys Workbench en su módulo Explicit Dynamics. Posteriormente se dispuso del software Abaqus, y se comprobó su mayor eficiencia a la hora de realización de modelos complejos con gran número de componentes y sus mayores capacidades por lo que en modelos sucesivos se optó por el segundo software. De todas maneras, se comprobó que para el modelo de malla tipo Shell los resultados empleando Abaqus eran similares.

3.3.2.2 Tipo Beam

El segundo modelo que se trata de implementar se situaría en el extremo opuesto a la anterior aproximación. Se trata de reproducir la geometría real de la malla con la mayor exactitud posible, incluyendo curvaturas de los alambres e interacciones entre las distintas líneas de alambre que forman la malla. Este tipo de modelo ya ha sido reproducido con éxito por Escallón et al., 2015 sobre la malla denominada SPIDER en el contexto de una pantalla dinámica completa, y no sólo en ensayos estáticos o dinámicos de menores dimensiones, como es el caso de la malla de triple torsión simulada por Al-Budairi et al., 2017 o del Coz et al., 2009. Sin embargo, la malla SPIDER tiene unas dimensiones comparativamente mayores a las del segundo autor, así como también a la malla MT15000 que se pretende simular. Un mayor tamaño de malla implica un mayor tamaño

de los elementos de la misma. Incluso en las zonas de interacción entre alambres, en las que es necesario aplicar un refinamiento para conseguir un comportamiento adecuado, el tamaño de los elementos será mayor en el caso de la malla SPIDER que en la MT15000. Como consecuencia también del menor tamaño de la retícula en la MT15000, habrá de hacerse un modelo con un mayor número de elementos. El mínimo incremento estable de tiempo para el cálculo dinámico (y por tanto el coste computacional del modelo) viene definido/limitado por la dimensión más pequeña de elemento involucrado en el modelo.

Conociendo este factor limitante desde un principio, se decide realizar un modelo que corresponde a un ensayo de tracción lateral para comprobar la viabilidad de esta aproximación. Pese a obtener resultados bastante ajustados (Figura 50), se obtuvo un tiempo de cálculo final de alrededor de 2 horas, para una malla de dimensiones 1mx1m. Por tanto, se descartó esta opción para la simulación de la malla que habrán de simularse en pantallas de alrededor de 24 y 36 metros de largo y entre 3 y 5 metros de ancho.

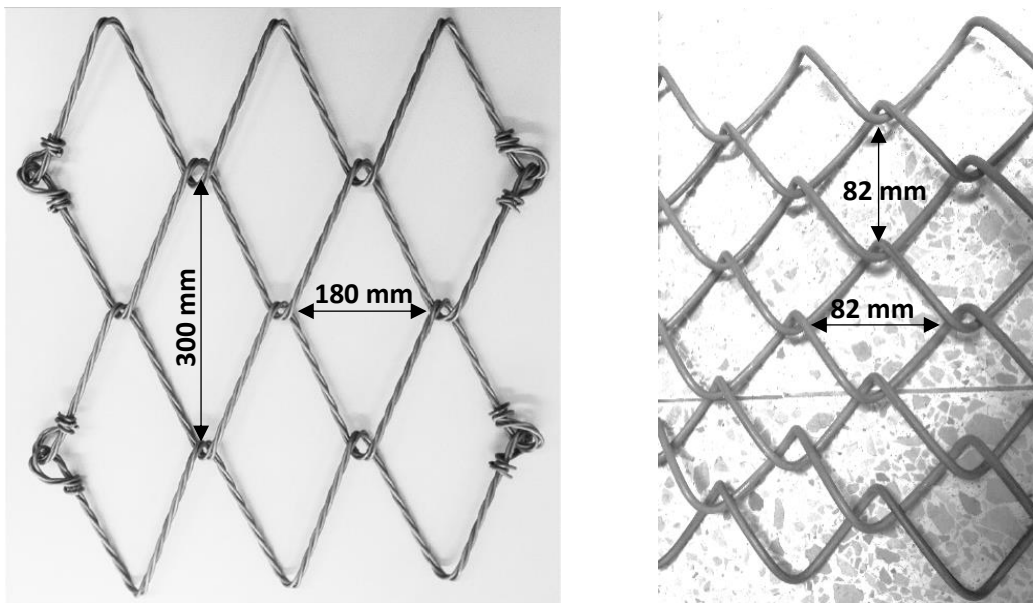


Figura 49. Dimensiones de la retícula a) en una malla SPIDER (Escallon et al. 2015) y b) en la malla MT15000.

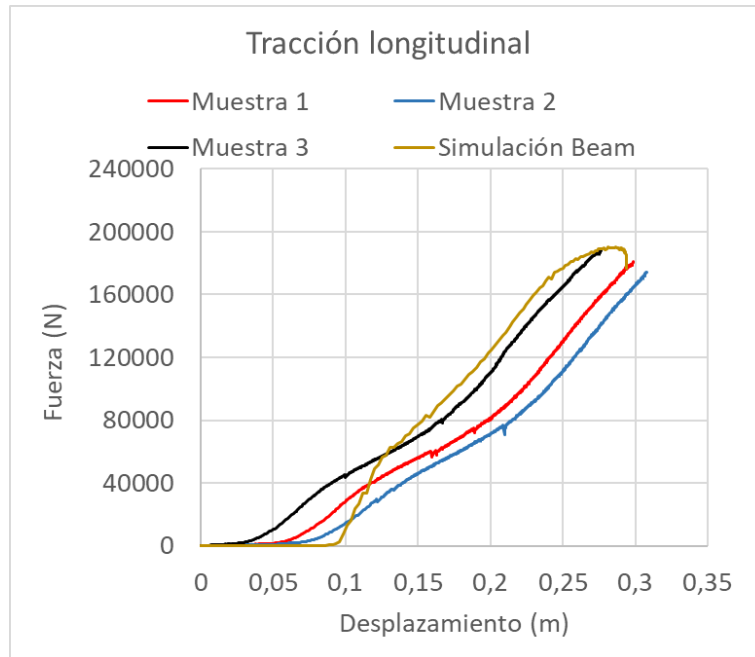


Figura 50. Resultados Fuerza-Desplazamiento de la simulación numérica de tracción lateral empleando elementos tipo BEAM junto con los resultados experimentales. Malla MT15000

3.3.2.3 Tipo truss

Tratando de encontrar una solución intermedia a las dos anteriores, se decidió realizar un modelo de retícula similar a la utilizada por otros autores para la red de cables cuadrada. Se emplean elementos tipo barra sin rigidez a flexión (truss) y se disponen en una retícula romboidal, con el fin de recrear la forma y ubicación de cada alambre de la malla. Aunque en la malla real los alambres de cada lado del rombo se encuentren ligeramente curvados, en los modelos numéricos se introduce una geometría simplificada en la que los alambres son líneas rectas. La sección de los elementos tipo truss es de $15,2 \text{ mm}^2$. El número de elemento por lado de la retícula es 3, menor que en el apartado anterior por lo que el tamaño de los elementos es mayor. Además, no existen modelos de interacción con fricción entre los alambres, sino que, en las intersecciones entre cuadros de la retícula, los elementos comparten nodo. Todo esto hace que el coste computacional sea bajo y por tanto sea el modelo seleccionado, y que se utilizará a lo largo de esta tesis.

Para realizar la calibración de la malla de alambre se debe encontrar una ley equivalente del material que sea capaz de reproducir el comportamiento de la misma tanto en el ensayo de tracción longitudinal en el plano como en el ensayo de punzonado perpendicular al plano.

En la simulación numérica de tracción lateral uno de los laterales tiene restringido el movimiento en las tres direcciones, mientras que en el lateral opuesto se impone un desplazamiento en sentido longitudinal (eje y positivo). Los laterales perpendiculares no permiten el desplazamiento en x ni en z, pero sí en y (Figura 51a). Para comparar los ensayos experimentales con los numéricos

se extraen las reacciones en el lateral fijo (en dirección del plano, que corresponde al eje y) y el desplazamiento en cualquiera de los puntos del lateral de tiro.

Por otra parte, el ensayo de punzonado se fija en todo su contorno ($U_x=U_y=U_z=0$), y se aplica una carga en el centro mediante una placa circular. En la simulación la carga se aplica mediante un desplazamiento impuesto en los nodos de la retícula que se encontrarían bajo la placa circular real en el caso real (Figura 51b). Al igual que en tracción lateral, se extraen las reacciones en el contorno de la red (en este caso en el eje z , perpendicular al plano), y el desplazamiento de uno de los puntos donde se aplica la carga circular.

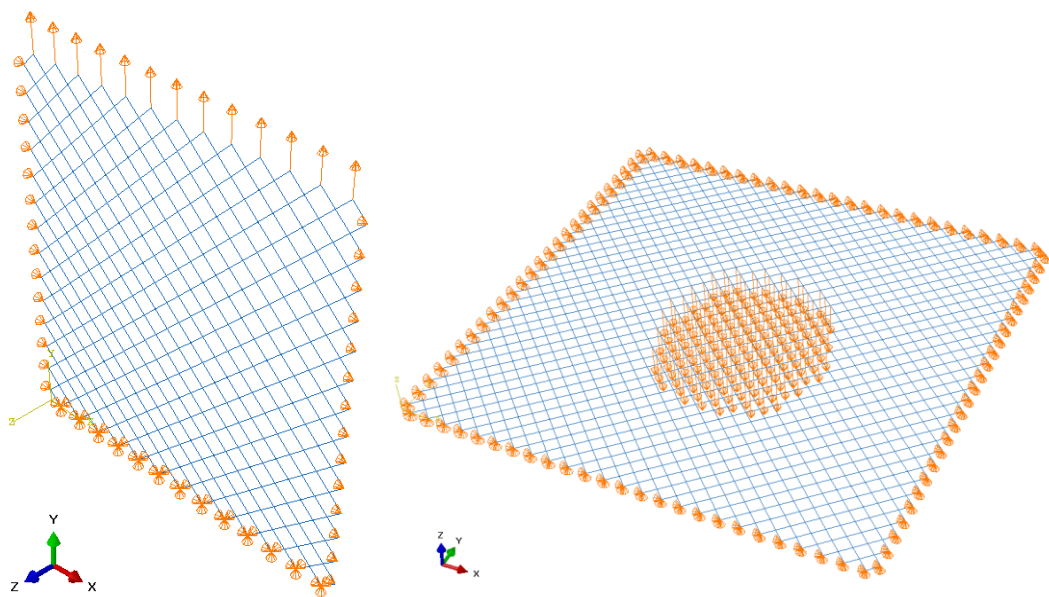


Figura 51. Geometría y condiciones de contorno incluidas en la simulación numérica a) del ensayo de tracción lateral y b) del ensayo de punzonado.

3.3.2.4 Aproximación mediante ley lineal

Se trata de la aproximación más sencilla. El material sigue una ley monótona lineal hasta llegar a la rotura. Se ha realizado un análisis previo con distintas pendientes de la ley lineal con el objetivo de ajustar las curvas experimentales a las numéricas. En las gráficas de la Figura 53 y Figura 54 se muestran las dos curvas más representativas.

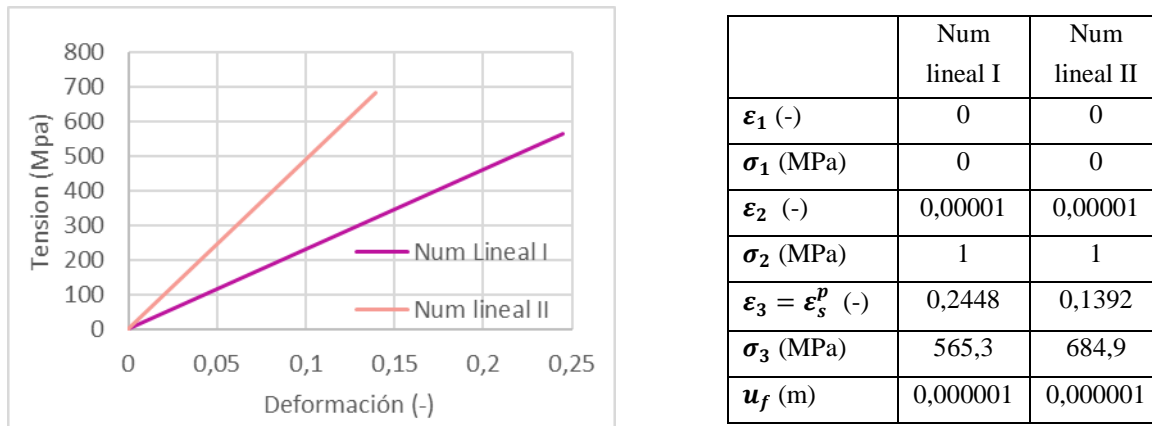


Figura 52. A) Curvas tensión (MPa)-deformación (-) introducidas a la malla de alambre en los modelos de elementos finitos y b) Tabla de datos del material introducido en ambos casos.

Comparando las curvas carga-desplazamiento de los dos ensayos experimentales con los de los resultados numéricos, se observa que el modelo de material lineal que consigue reproducir casi con total exactitud el ensayo de punzonado (Num. lineal I) presenta una gran discrepancia a lo largo de toda la curva en el ensayo de tracción, con unos errores en la fuerza y el desplazamiento finales del 20,85 y 77,62 %, respectivamente, respecto del comportamiento real. Por otra parte, la ley lineal que consigue reproducir el ensayo de tracción lateral (Num. lineal II), resulta tener una rigidez muy alta si se aplica al ensayo de punzonado, suponiendo un error de fuerza y desplazamiento finales de 19,76 y un 18,95 % respecto de las muestras experimentales.

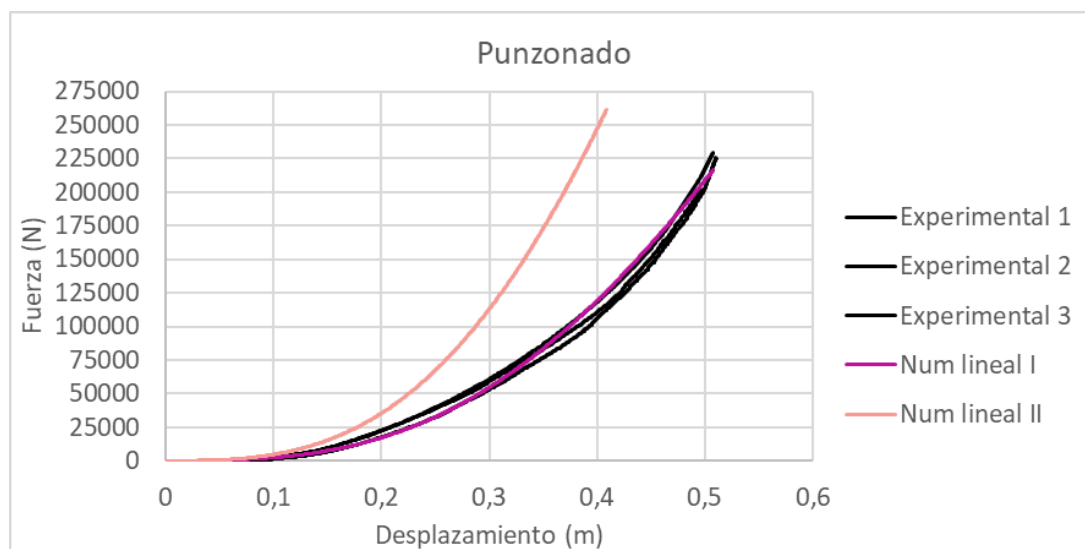


Figura 53. Curvas Fuerza-Desplazamiento correspondientes al ensayo de punzonado. Comparación de los resultados experimentales y simulación numérica con ley lineal.

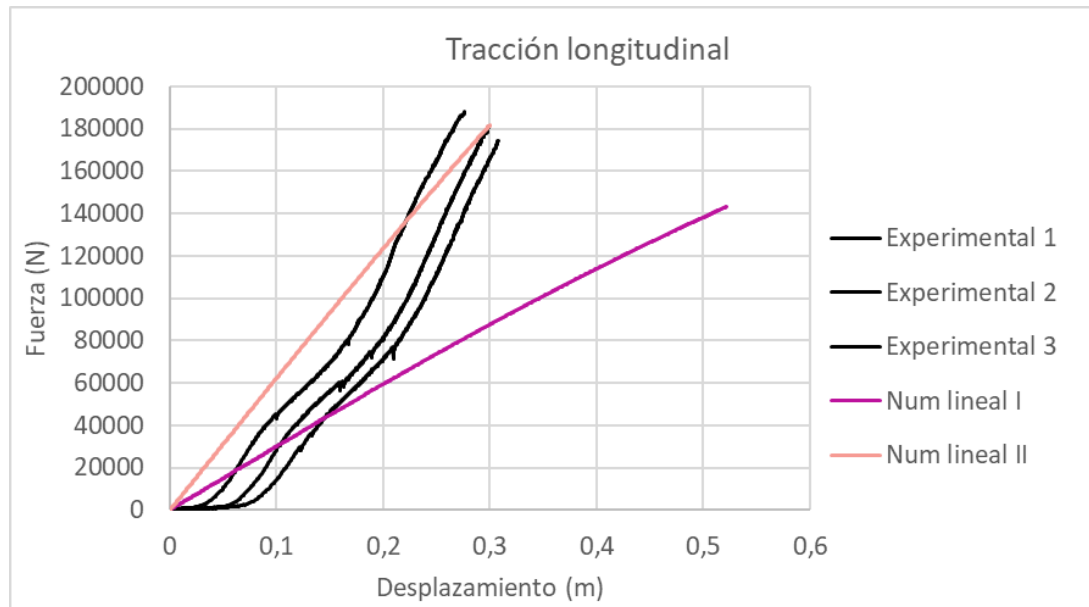


Figura 54. Curvas Fuerza-Desplazamiento correspondientes al ensayo de tracción lateral. Comparación de los resultados experimentales y simulación numérica con ley lineal.

Las grandes diferencias encontradas en ambos casos indican la necesidad de buscar otras alternativas en la definición del material que sea capaz de reproducir simultáneamente los dos ensayos con un límite máximo de error que se establecerá en un 10%.

3.3.2.5 Aproximación ley bilineal

La segunda aproximación consiste en la introducción de una ley bilineal creciente hasta rotura en el punto de máxima deformación. El planteamiento de esta ley surge de la observación de los ensayos experimentales, especialmente los correspondientes a la tracción en el plano, en los que se aprecia una primera fase donde los alambres se estiran hasta perder su curvatura inicial, seguida de una segunda fase en la que parece aumentar la rigidez del conjunto hasta que se produce la rotura en la zona más debilitada. En la Figura 52 y en la Tabla 10 se indican las propiedades del material que se analizaron en Abaqus para las 4 opciones más favorables.

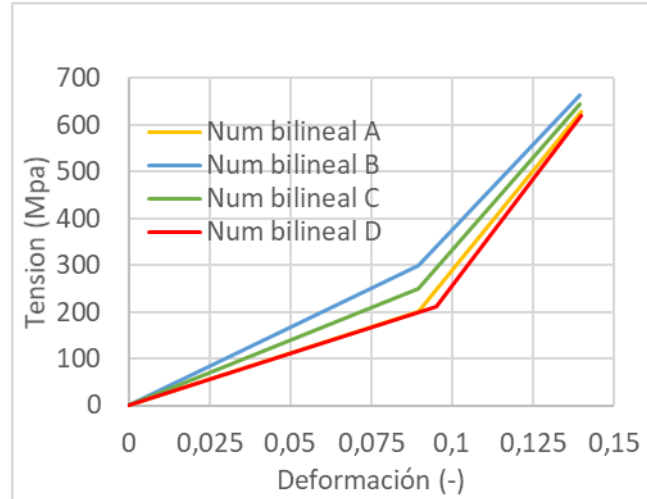


Figura 55. Curvas tensión (MPa)-deformación (-) bilineales introducidas a la malla de alambre en los modelos de elementos finitos.

Tabla 10. Parámetros del material introducidas a la malla de alambre en los modelos de elementos finitos.

| | Num bilineal A | Num bilineal B | Num bilineal C | Num bilineal D |
|---------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| ε_1 (-) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| σ_1 (MPa) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ε_2 (-) | 0,00001 | 0,00001 | 0,00001 | 0,00001 |
| σ_2 (MPa) | 1 | 1 | 1 | 1 |
| ε_3 (-) | 0,08962 | 0,08962 | 0,08962 | 0,095 |
| σ_3 (MPa) | 200 | 300 | 250 | 212 |
| $\varepsilon_4 = \varepsilon_s^p$ (-) | 0,1398 | 0,1394 | 0,1396 | 0,1399 |
| σ_4 (MPa) | 627,9 | 662,7 | 645,2 | 618,8 |
| u_f (m) | 0,000001 | 0,000001 | 0,000001 | 0,000001 |

En la Figura 53 puede verse que en los cuatro casos que se presentan con leyes de tipo bilineal se alcanza un mayor nivel de aproximación a lo largo de todo el recorrido de la curva $F - \delta$ correspondiente al ensayo de tracción lateral respecto a la aproximación lineal descrita en la sección anterior. Incluso en algunos casos la pendiente de la segunda parte de la curva es coincidente con la real, como ocurre con el caso D.

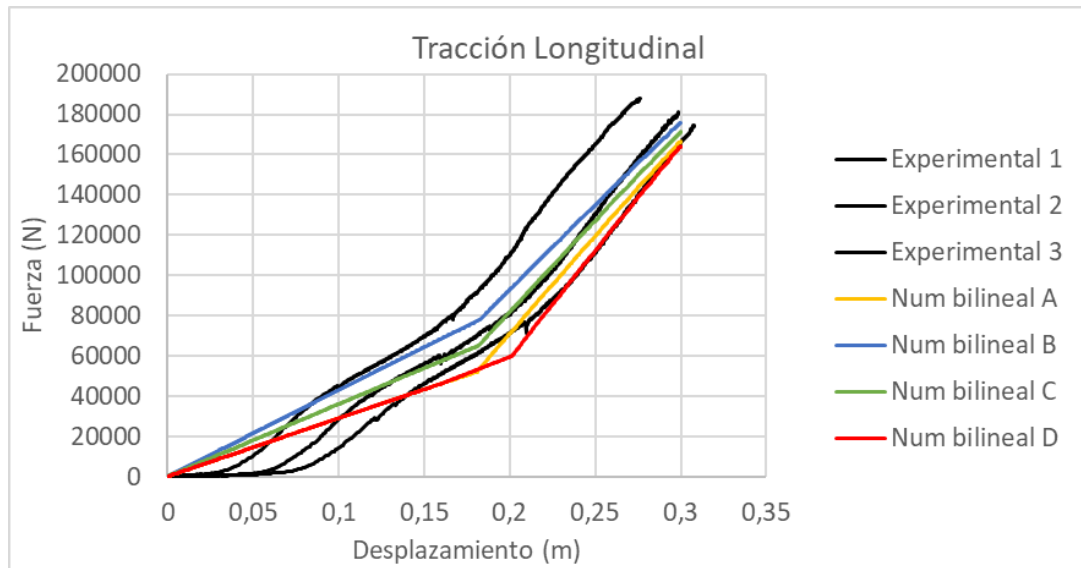


Figura 56. Curvas Fuerza-Desplazamiento correspondientes al ensayo de tracción longitudinal. Comparación de los resultados experimentales y simulación numérica con ley bilineal.

Con respecto a las curvas obtenidas en punzonado, se puede afirmar que:

Introduciendo los materiales A y D (que poseen la misma pendiente del primer tramo de la ley bilineal) las curvas experimentales y las procedentes de la simulación son coincidentes hasta llegar a un punto que está directamente relacionado con la posición del punto (ε_3, σ_3). A partir de dicho punto las curvas experimentales y las numéricas se separan, ya que las segundas adquieren una tendencia ascendente más rápida provocado por la mayor rigidez impuesta en el segundo tramo de la ley bilineal.

La curva F- δ empleando la ley bilineal B se comienza a separar de las experimentales apenas comienza el ensayo, indicando un comportamiento excesivamente rígido. Adicionalmente, no se aprecia un incremento de pendiente del tramo final tan acentuado como en los casos A y D, puesto que las 2 pendientes de la ley del material no son tan pronunciadas.

Podríamos considerar que el material C tiene un comportamiento intermedio entre los dos descritos anteriormente.

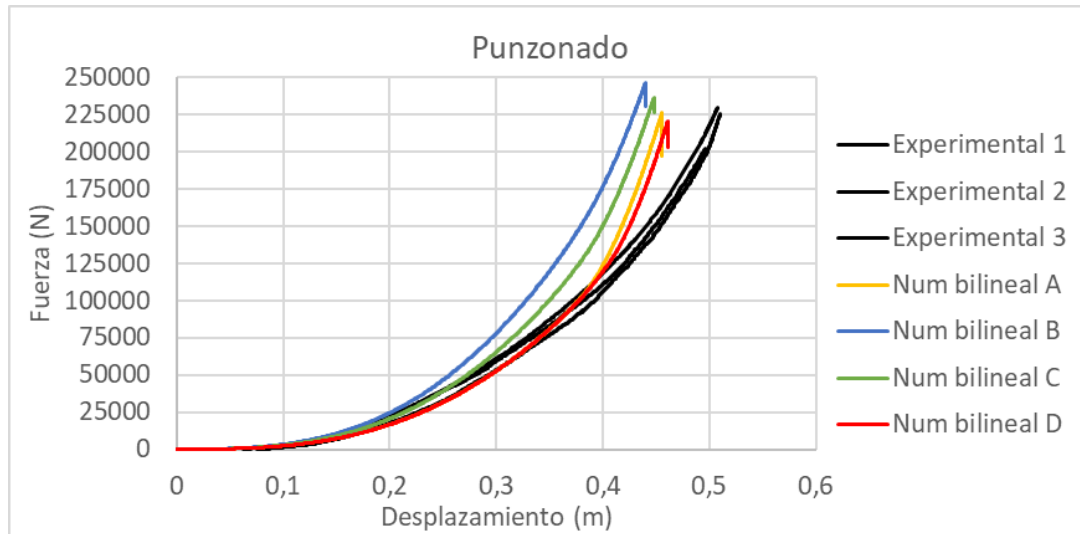


Figura 57. Curvas Fuerza-Desplazamiento correspondientes al ensayo de punzonado. Comparación de los resultados experimentales y simulación numérica con ley bilineal.

3.3.2.6 Aproximación ley trilineal

La aproximación trilineal surge con el objetivo de mejorar la calibración del ensayo de tracción lateral en la primera parte de la curva, donde para un valor muy bajo de carga, se produce un desplazamiento grande, fruto de la toma de contacto inicial entre las espiras de la malla.

En la Figura 58 y en la Tabla 11 se pueden ver las propiedades introducidas al material.

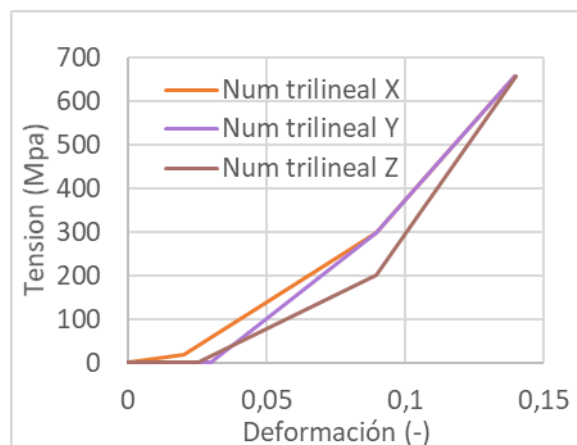


Figura 58. Curvas tensión (MPa)-deformación (-) trilineales introducidas a la malla de alambre en los modelos de elementos finitos.

Tabla 11. Parámetros del material introducidas a la malla de alambre en los modelos de elementos finitos.

| | Num trilineal X | Num trilineal Y | Num trilineal Z |
|---------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| ε_1 (-) | 0 | 0 | 0 |
| σ_1 (MPa) | 0 | 0 | 0 |
| ε_2 (-) | 0,00001 | 0,00001 | 0,00001 |
| σ_2 (MPa) | 1 | 1 | 1 |
| ε_3 (-) | 0,02 | 0,03 | 0,025 |
| σ_3 (MPa) | 20 | 1 | 1 |
| ε_4 (-) | 0,08962 | 0,1394 | 0,1396 |
| σ_4 (MPa) | 200 | 662,7 | 645,2 |
| $\varepsilon_5 = \varepsilon_s^p$ (-) | 0,1395 | 0,1395 | 0,1398 |
| σ_5 (MPa) | 658,4 | 658,8 | 658,8 |
| u_f (m) | 0,000001 | 0,000001 | 0,000001 |

Empleando la ley trilineal Y el ajuste del ensayo de tracción mejora sensiblemente, sobre todo utilizando la ley Y. Sin embargo, el ensayo de punzonado se ve afectado negativamente, existe una mayor discordancia entre las curvas numéricas respecto de las experimentales a lo largo de todo el ensayo, sobre todo en los casos Y y Z. En ellos, en un primer tramo hasta un valor entre 0,35 - 0,4 m la carga obtenida numéricamente es inferior a la experimental. Después de ese desplazamiento la carga obtenida numéricamente se encuentra por encima de la experimental.

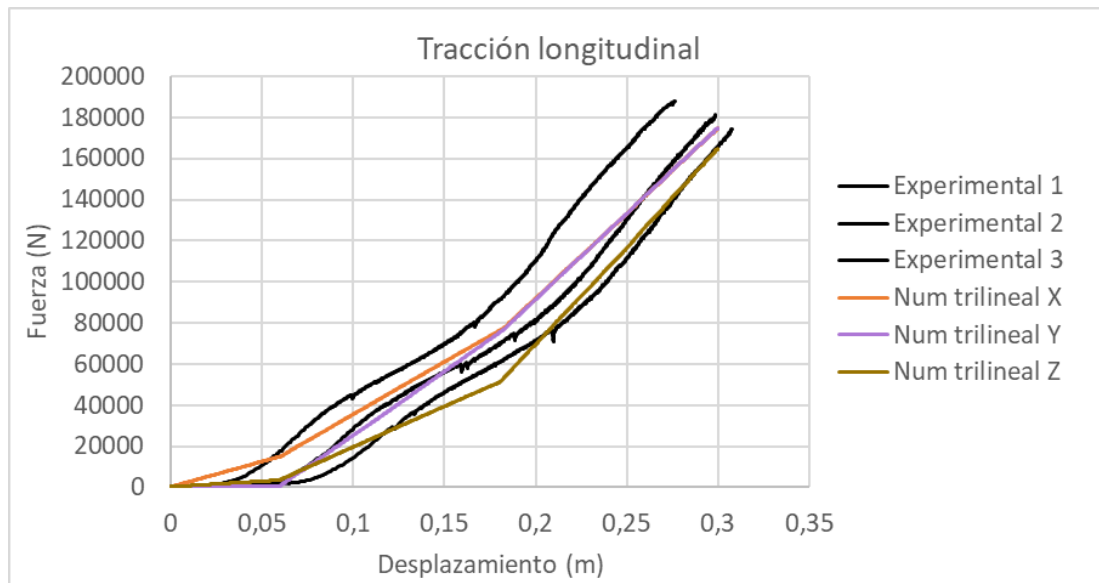


Figura 59. Curvas Fuerza-Desplazamiento correspondientes al ensayo de tracción longitudinal. Comparación de los resultados experimentales y simulación numérica con ley trilineal.

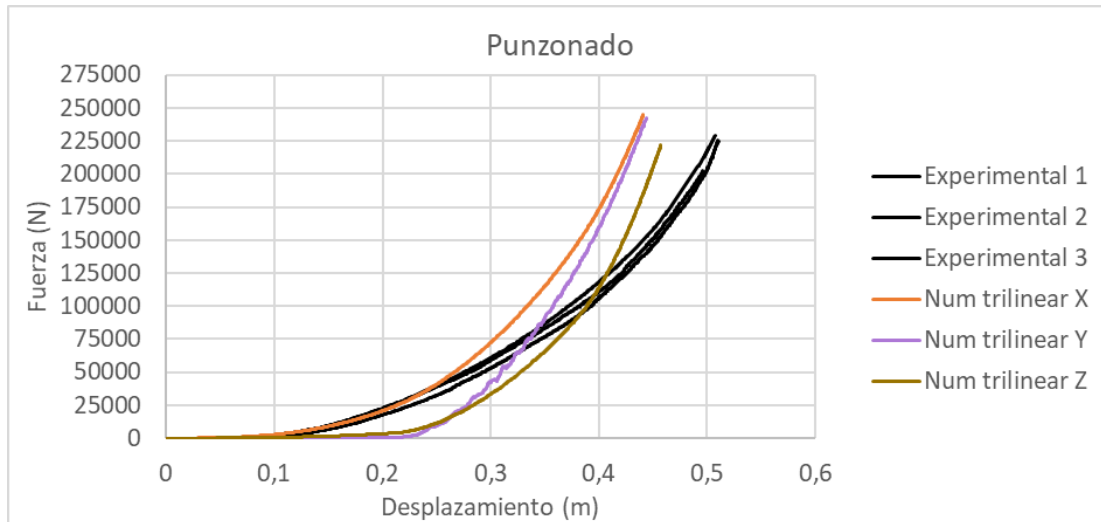


Figura 60. Curvas Fuerza-Desplazamiento correspondientes al ensayo de punzonado. Comparación de los resultados experimentales y simulación numérica con ley trilineal.

3.3.2.7 Análisis de resultados y selección del modelo

Para decidir cuál es el mejor modelo se calculan los errores del desplazamiento y fuerza final respecto de cada una de las muestras, seguida de una media de los errores de los tres casos (Tablas 3 a 6).

Tabla 12. Errores en desplazamiento final en todos los modelos numéricos implementados de ensayo de tracción lateral a la malla MT15000.

| ERROR EN DESPLAZAMIENTO FINAL | | | | |
|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| | Error respecto de muestra 1 (%) | Error respecto de muestra 2 (%) | Error respecto de muestra 3 (%) | Media errores (%) |
| Num lineal I | 74,62 | 69,53 | 88,71 | 77,62 |
| Num lineal II | 0,47 | 2,46 | 8,58 | 3,84 |
| Num bilineal A | 0,46 | 2,47 | 8,57 | 3,83 |
| Num bilineal B | 0,47 | 2,46 | 8,57 | 3,83 |
| Num bilineal C | 0,46 | 2,46 | 8,57 | 3,83 |
| Num bilineal D | 0,47 | 2,46 | 8,57 | 3,83 |
| Num trilineal X | 0,47 | 2,46 | 8,58 | 3,84 |
| Num trilineal Y | 0,46 | 2,46 | 8,57 | 3,83 |
| Num trilineal Z | 0,47 | 2,46 | 8,57 | 3,83 |

Tabla 13. Errores en fuerza final en todos los modelos numéricos implementados de ensayo de tracción lateral a la malla MT15000.

| ERROR EN FUERZA FINAL | | | | |
|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| | Error respecto de muestra 1 (%) | Error respecto de muestra 2 (%) | Error respecto de muestra 3 (%) | Media errores (%) |
| Num lineal I | 20,98 | 17,79 | 23,79 | 20,85 |
| Num lineal II | 0,30 | 4,35 | 3,26 | 2,64 |
| Num bilineal A | 8,04 | 4,33 | 11,31 | 7,90 |
| Num bilineal B | 2,96 | 0,96 | 6,41 | 3,44 |
| Num bilineal C | 5,52 | 1,70 | 8,87 | 5,36 |
| Num bilineal D | 9,39 | 5,74 | 12,61 | 9,25 |
| Num trilineal X | 3,58 | 0,31 | 7,00 | 3,63 |
| Num trilineal Y | 3,51 | 0,38 | 6,94 | 3,61 |
| Num trilineal Z | 9,03 | 5,36 | 12,26 | 8,89 |

Tabla 14. Errores en desplazamiento final en todos los modelos numéricos implementados de ensayo de punzonado a la malla MT15000.

| ERROR EN DESPLAZAMIENTO FINAL | | | | |
|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| | Error respecto de muestra 1 (%) | Error respecto de muestra 2 (%) | Error respecto de muestra 3 (%) | Media errores (%) |
| Num lineal I | 0,07 | 2,47 | 0,46 | 1,00 |
| Num lineal II | 19,45 | 17,52 | 19,88 | 18,95 |
| Num bilineal A | 10,25 | 8,10 | 10,73 | 9,69 |
| Num bilineal B | 13,31 | 11,23 | 13,76 | 12,76 |
| Num bilineal C | 11,72 | 9,61 | 12,19 | 11,17 |
| Num bilineal D | 9,22 | 7,04 | 9,70 | 8,65 |
| Num trilineal X | 13,11 | 11,02 | 13,56 | 12,57 |
| Num trilineal Y | 12,57 | 10,48 | 13,03 | 12,03 |
| Num trilineal Z | 9,92 | 7,76 | 10,39 | 9,35 |

Tabla 15. Errores en fuerza final en todos los modelos numéricos implementados de ensayo de punzonado a la malla MT15000.

| ERROR EN FUERZA FINAL | | | | |
|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| | Error respecto de muestra 1 (%) | Error respecto de muestra 2 (%) | Error respecto de muestra 3 (%) | Media errores (%) |
| Num lineal I | 5,46 | 7,07 | 3,87 | 5,47 |
| Num lineal II | 14,07 | 29,20 | 16,00 | 19,76 |
| Num bilineal A | 1,29 | 11,79 | 0,37 | 4,49 |
| Num bilineal B | 7,43 | 21,67 | 9,24 | 12,78 |
| Num bilineal C | 3,04 | 16,70 | 4,78 | 8,17 |
| Num bilineal D | 3,94 | 8,80 | 2,32 | 5,02 |
| Num trilineal X | 6,77 | 20,93 | 8,57 | 12,09 |
| Num trilineal Y | 5,61 | 19,62 | 7,39 | 10,88 |
| Num trilineal Z | 3,33 | 9,49 | 1,70 | 4,84 |

Se observa que los errores en desplazamiento en tracción lateral son en torno al 3,83 % en todos los casos excepto en el primero. Esto es debido a que este ensayo es el que se ha utilizado para definir el punto de rotura de la malla. El procedimiento consistió en realizar en primer lugar la simulación numérica de tracción, imponiendo un desplazamiento de 0,3 metros. La tensión y deformación plástica obtenida al final del ensayo, que corresponden a los valores máximos de la simulación se toman para establecer el límite de rotura. Estos valores se introducen en el ensayo de punzonado con el objetivo de obtener el instante de rotura de este ensayo. La media de errores en la simulación con material lineal I resulta diferente ya que fue el único caso en el que se hizo el procedimiento a la inversa. Puesto que con el material I el ajuste del ensayo de punzonado resultó ser muy preciso, se decide tomar como valores de rotura la tensión y deformación plástica última de este ensayo, para luego aplicar dicho criterio de rotura en el ensayo de tracción.

Entre todos los modelos implementados se selecciona el numérico bilineal A por ser tener una media de errores menor, no superando el 10 % en ninguno de los valores evaluados.

3.4 Análisis de un paño de red

Las membranas (bien sean redes de cable, mallas de alambre o redes de anillos) generalmente se ensayan en bastidores cuadrados como los descritos en el apartado 2.4.5.1. En estos casos las restricciones en contorno son idénticas en los 4 lados del bastidor, y los resultados de capacidad energética y de flecha máxima no pueden ser directamente extrapolables al caso de una pantalla dinámica completa con todos sus elementos.

Por ello, como paso previo al análisis de las redes sobre una pantalla completa, se analizan 2 modelos distintos para cada una de las 3 alternativas de membranas. Ambos modelos representan un solo paño de 10x3 metros. Dos de sus laterales disponen de cables perimetrales, cuyos desplazamientos están únicamente restringidos en sus extremos ($U_x=U_y=U_z=0$). Los lados de la membrana que no están ligados a los cables perimetrales tienen restringidos los desplazamientos en las dos direcciones del plano de la malla, pero no en la perpendicular ($U_x=U_y=0$). Los giros están liberados en todos los casos. En el primer modelo la membrana está unida físicamente al cable perimetral compartiendo nodos en común. En contraposición, la conexión de la red a los cables perimetrales en el segundo modelo se realiza mediante anillas rígidas a modo de grilletes. Estas anillas impiden la separación entre el cable perimetral y la membrana puesto que conectan ambos elementos, pero permiten el deslizamiento, lo que suaviza las condiciones de contorno del primer modelo. El comportamiento del contacto en la dirección tangencial se aproxima mediante el modelo de Coulomb. En la Figura 62 se muestran las condiciones de contorno para los dos casos analizados para la red triangular con orientación O1, siendo similares para el resto de las membranas.

Para definir el comportamiento de los cables perimetrales, inicialmente se utilizó la curva tensión-deformación de la Figura 61, correspondiente a un cable de 22 mm, cuya sección equivalente es 227 mm². Sin embargo, dicho cable resulta poco resistente y se verifica en varios cálculos iniciales que los cables perimetrales fallan antes de que lo hagan las redes. Puesto que no se dispone de datos de ensayos de tracción a cables de mayor diámetro de 22 mm, se decide continuar empleando la misma curva tensión-deformación que la del cable de diámetro 22 mm, pero se aumenta la sección de este a 317 mm², lo que supone una carga de rotura de 523 kN. Esto proporciona una resistencia suficientemente alta como para que los cables perimetrales no se rompan para ninguno de los casos estudiados.

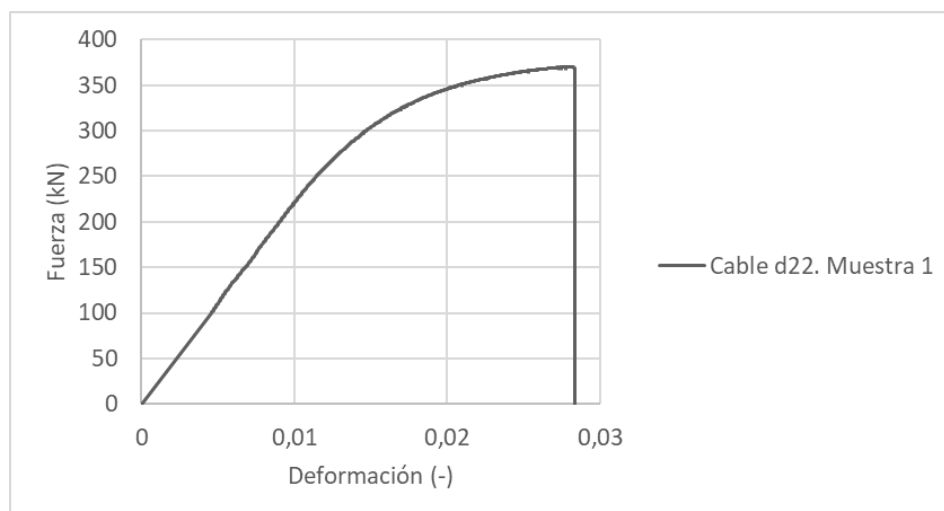


Figura 61. Curva Fuerza-Deformación de una muestra de cable de diámetro 22 mm.

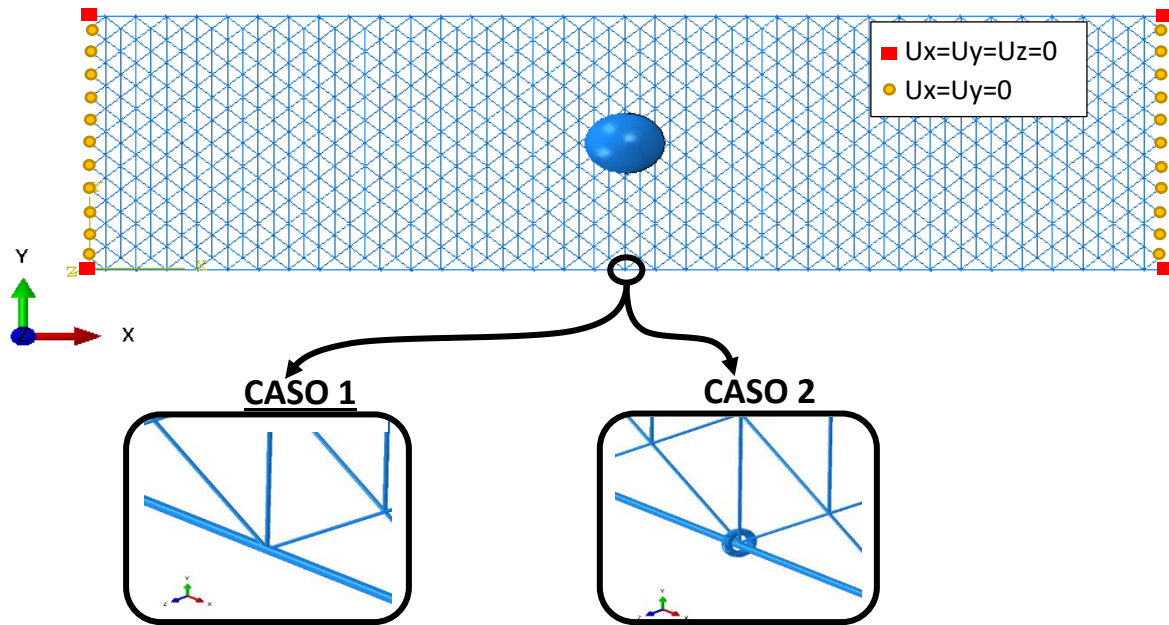


Figura 62. Condiciones de contorno del modelo de 1 solo paño en los extremos y en la unión cable perimetral-red. En el caso 1 se representa la unión fija entre la red y el perimetral, mientras que en el caso 2 se representa la unión mediante grilletes.

Para todos los casos se empleará como elemento de impacto un bloque esférico de 500 kg y densidad 2500 kg/m³. El bloque de hormigón se coloca en el centro del paño unos pocos milímetros por encima del mismo. Con el objetivo de encontrar la máxima energía capaz de absorber el paño de malla sin romperse se varía la velocidad inicial del bloque, con incrementos de 0.1 m/s, hasta que obtiene la velocidad inicial para la cual la red no es capaz de soportar el impacto. La energía máxima por tanto se obtiene como la energía cinética del bloque para la velocidad inmediatamente menor a la que provoca la ruptura de la red: $E = \frac{1}{2}mv^2$

3.4.1 Distribución de tensiones

La distribución de las tensiones a lo largo de los cables en la red triangular con orientación O1 resulta ser muy diferente para los 2 casos analizados. En el primer caso las tensiones forman en su recorrido una forma de X en la red hasta llegar a los cables perimetrales. A partir de ahí las tensiones se transmiten únicamente por los cables perimetrales hasta llegar a los anclajes situados en los extremos de los mismos. Por el contrario, la liberación del movimiento a través de los grilletes hace que las tensiones se transmitan por los cables de red perpendiculares a los cables perimetrales y coincidentes con la zona de impacto, para posteriormente recorrer los perimetrales de nuevo hasta los anclajes. Además, se puede apreciar que parte de las tensiones también se transmiten por la red creando un patrón de cruces hasta llegar a ambos extremos.

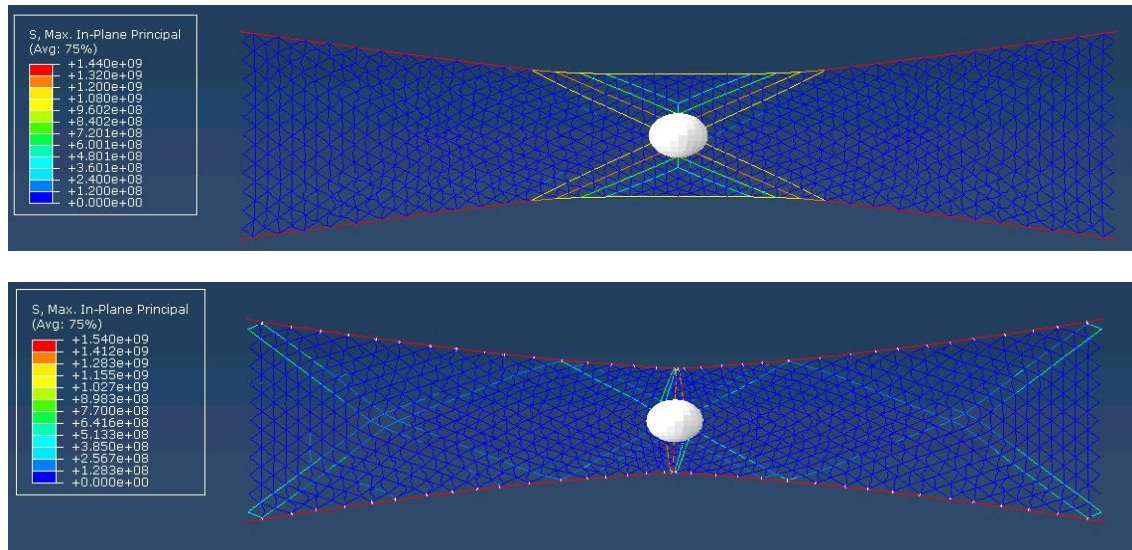


Figura 63. Distribución de tensiones en el modelo de 1 paño que incluye la red de cables triangular O1: a) con unión fija, y b) con unión mediante grilletes.

A diferencia de lo que ocurre con la red triangular O1, para la red triangular O2 no se observan diferencias relevantes en función de la utilización de la unión fija o con grilletes entre la red y los cables perimetrales. En ambos casos la tensión se transmite por los cables de la red paralelos a los perimetrales y coincidentes con la zona de impacto. A cierta distancia de cada uno de los extremos las tensiones se bifurcan en dirección a los 2 anclajes de los cables perimetrales. Se podría decir que los cables perimetrales no juegan un papel relevante empleando este tipo de red ya que no se trata de los elementos más cargados del modelo.

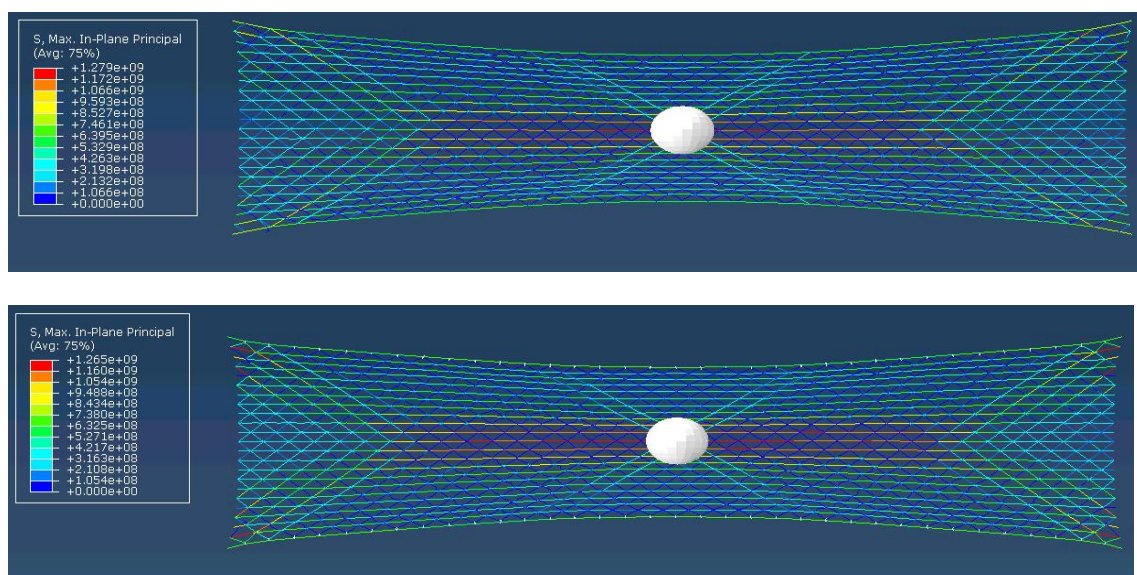


Figura 64. Distribución de tensiones en el modelo de 1 paño que incluye la red de cables triangular O2: a) con unión fija, y b) con unión mediante grilletes.

Por último, en lo que respecta a la malla de alambre, esta se comporta de manera similar independientemente de las condiciones de contorno. Las tensiones inducidas en el impacto se transmiten a través de la malla en forma de cruz, y continúan por los cables perimetrales hasta los anclajes de los mismos. La única variación se encuentra en el estado de carga de los cables perimetrales. Al establecer una unión fija entre la malla y los perimetrales, estos últimos sufren un mayor estado de carga desde los extremos de la cruz creada en la red hasta los anclajes de los extremos. Sin embargo, en el caso con grilletes se permite un cierto deslizamiento, con lo que se produce una mayor uniformidad en las tensiones de los cables perimetrales. Además, la cruz principal de la malla de alambres sufre menores tensiones respecto al caso en el que la unión es fija, ya que las tensiones se distribuyen en cruces sucesivas, adquiriendo una mayor relevancia en las zonas cercanas a los extremos (Figura 66).

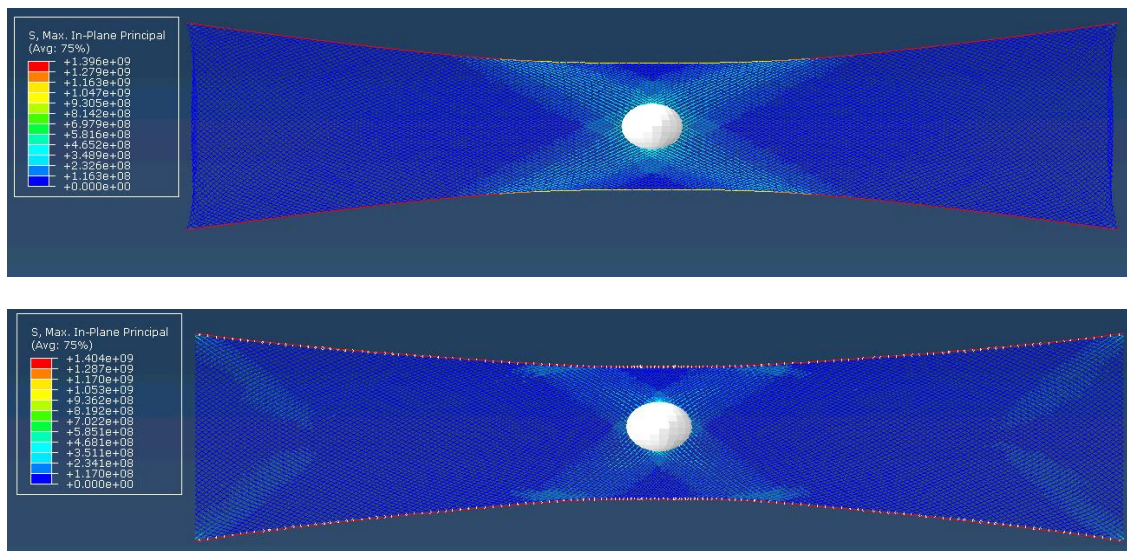


Figura 65. Distribución de tensiones en el modelo de 1 paño que incluye la malla de alambre MT15000: a) con unión fija, y b) con unión mediante grilletes.

Eliminando de la representación los cables perimetrales se puede apreciar mejor la distribución en cruz.

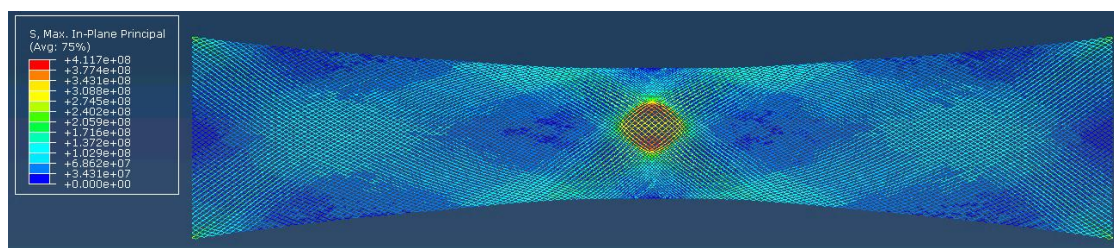


Figura 66. Detalle de la distribución de tensiones únicamente sobre la malla MT15000 del modelo con grilletes.

3.4.2 Influencia de la unión perimetral-malla en la energía máxima

Con el objetivo de poder realizar una comparativa con alguna de las mallas existentes en la bibliografía y ya empleadas para la retención de bloques, se ha implementado un modelo de FEM de red cuadrada de 200x200 mm de tamaño de cuadrícula y cable de diámetro 8 mm. Los cables de la retícula se han modelizado de forma similar a la red triangular descrita en 3.3.1, mediante elementos sin rigidez a flexión, y utilizando la curva tensión-deformación verdadera del cable, obtenida a partir de ensayos de tracción.

La unión entre la red (o malla) y los cables perimetrales a través de grilletes se simula en cuatro casos diferentes, empleando cuatro coeficientes de rozamiento, que varían entre 0,6 y 0. Este procedimiento es completamente necesario, pues marcará nuestra inclinación por un sistema más rígido o bien con una mayor capacidad de desplazamiento relativo. Asimismo, conviene recordar que estos modelos numéricos representan una simplificación de la realidad, por lo que, aunque la conexión se representa geoméricamente utilizando unas anillas cilíndricas a modo de grilletes, esta misma representación simplificada se podría utilizar en el caso de que la unión membrana-cables perimetrales se hiciese mediante un cable auxiliar de cosido. Por ello, aunque la representación sea idéntica, los coeficientes de rozamiento entre las anillas y los cables perimetrales marcarían la rigidez del sistema, que será mayor utilizando cable de cosido respecto al cosido mediante grilletes de acero. Podría pensarse que los coeficientes de rozamiento se podrían extraer directamente de los datos experimentales de rozamiento acero-acero. Sin embargo, hay que considerar que los cables poseen una superficie rugosa debida al entrecruzamiento de los alambres que lo forman, por lo que el dato previamente pensado resulta inválido.

Los resultados de energía absorbida por unidad de masa de un paño se muestran en la gráfica de la Figura 67. En ella se comprueba que la unión con rozamiento entre los cables perimetrales y la membrana incrementa notablemente la máxima energía/masa capaz de retener respecto a los casos de unión fija, tanto en la red cuadrada, en la red triangular con orientación O1 y en la MT15000. El porcentaje máximo de dicho incremento de energía es del 153%; 100% y 65%, respectivamente. Este incremento de energía por masa aparece a consecuencia de la mayor flecha obtenida, que resulta de liberar los grados de libertad del contorno de la retícula, permitiendo un cierto deslizamiento de toda la membrana hacia la zona del impacto. Cuanto menores son las restricciones de desplazamiento; es decir, menor es el coeficiente de rozamiento, mayor es la flecha obtenida. Y como es sabido, la energía es la resultante de integrar la curva carga-desplazamiento, que en este caso sería las fuerzas de reacción frente a la elongación o flecha de la membrana.

Sin embargo, la red triangular O2 no sufre la misma tendencia, sino que la variación del tipo de unión perimetral y contacto sin fricción es prácticamente irrelevante a los resultados de energía obtenidos. Estos resultados tienen su explicación en la mínima influencia del cable perimetral en

el comportamiento de la red, tal y como se había comprobado mediante la Figura 64. La geometría de la propia retícula es la que impide el deslizamiento de la misma sobre los cables perimetrales, ya que los cables de la red que se encuentran en la misma dirección que los perimetrales son los que resultan más cargados y rigidizan la membrana. Esto hace que la flecha será similar independientemente del coeficiente de rozamiento y por tanto la energía también.

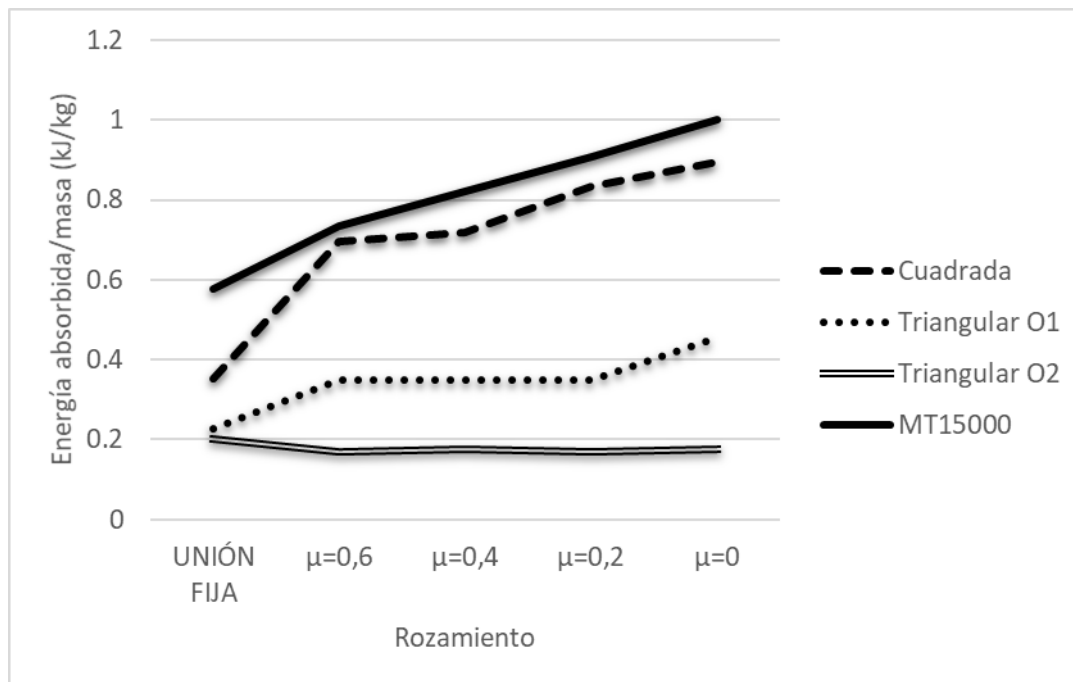


Figura 67. Gráfica de energía absorbida por unidad de masa de un paño en función del tipo de unión y rozamiento entre los cables perimetrales y la red o malla.

Además, se aprecia que, para las redes de cable triangulares, no existe apenas variación de energía absorbida por unidad de masa cuando se varía el coeficiente de rozamiento entre 0,2 y unión fija, al contrario de lo que ocurre en la malla de alambre y en la red cuadrada, donde si existe un aumento progresivo en la energía absorbida a medida que se reduce el coeficiente de rozamiento.

El comportamiento de la red triangular O1 observado tras la variación de los coeficientes de rozamiento se debe a la gran variación de la distribución de cargas en dicha red entre el caso con unión fija y el caso con deslizamiento mediante grilletes (Figura 63). En el primer caso las tensiones se reparten a lo largo de una mayor cantidad de cables, que se posicionan en forma de cruz. De manera totalmente distinta, cuando se incluyen los grilletes, los cables más cargados son los que se ubican en posición perpendicular a los cables perimetrales, por lo que la red rompe por esos cables y el deslizamiento respecto a los cables perimetrales es un comportamiento que casi no ocurre por la rápida rotura de los cables perpendiculares.

En conclusión, en todos los casos la malla MT15000 es la que mayor kJ/kg es capaz de absorber, seguida de la red cuadrada. A la cola se encuentra la red triangular O1 y, por último, la red triangular O2. En cierto sentido, se considera que la triangularización de las redes cuadradas no aporta ventajas reseñables pese a la adición de material, sino que aportan una mayor rigidez en el sentido en el que se disponen los cables que forman la diagonal de la red, ya que imposibilitan o dificultan el deslizamiento de esta a la zona de impacto.

3.5 Análisis de una pantalla completa

Una vez completado el análisis previo analizando solo un paño de la red (o malla), se procede al análisis de las mismas dentro de una pantalla completa. Como paso previo a la implementación de un modelo de pantalla completa es necesario tener un modelo de referencia que nos sirva para corroborar que los modelos que se realicen derivados de este van a tener validez.

El grupo GITECO lleva varios años colaborando con la empresa cántabra MTC (MallaTalud Cantabria). Esta compañía ofrece entre su rango de productos dos pantallas dinámicas, IBT-150 de 150 kJ de energía e IBT-500 con una capacidad de retención de 500 kJ. La pantalla IBT-150 fue diseñada a partir de una tesis doctoral realizada en el grupo GITECO (López Quijada, 2007). Ambas pantallas fueron ensayadas siguiendo las recomendaciones de la ETAG027, y la monitorización que se ha realizado de las mismas aportan una gran cantidad de datos, que serán utilizados en esta sección para la comprobación de los modelos numéricos.

3.5.1 Calibración de dos pantallas dinámicas IBT150 e IBT500

3.5.1.1 Descripción de las pantallas

La pantalla dinámica IBT-150 (Figura 68) consta de 3 módulos funcionales de 10 metros de largo y 3 metros de alto, inclinados un ángulo de 8 grados sobre la horizontal. La estructura de intercepción la forman una red de cables principal de diámetro 8 mm y retícula cuadrada de lado 200 mm, y una malla secundaria de alambre de triple torsión, cuyo objetivo es retener los desprendimientos de menor tamaño. Los postes son de tipo tubular, de diámetro exterior 114,3 mm y espesor 4 mm. Los cables perimetrales y vientos laterales y superiores son de diámetro 16 mm. En cada uno de los vientos laterales y superiores (8 en total) se instaló un disipador de energía de doble U. La conexión de los postes al terreno se realiza mediante una pieza que consta de un manguito que se rosca al bulón de anclaje del terreno y de una pieza con un orificio, en el que se conecta el poste empleando un pasador. La pieza de conexión se completa con una placa soldada en la que se colocan unos sujetacables que permiten el guiado de los cables perimetrales.

Por su parte, la pantalla dinámica IBT-500 (Figura 69) está formada por 3 módulos funcionales de 10 metros de largo y 4 metros de alto y con una inclinación de 10 grados respecto a la horizontal. La estructura de intercepción es idéntica a la de la pantalla IBT-150. Los postes son de tipo HEB de 160 mm, y se emplean cables perimetrales de diámetro 22 mm. Los vientos laterales y superiores son de diámetro 16 mm, y en cada uno de ellos (un total de 12) se instala un freno de doble U. Por último, la fijación de los postes al terreno y guiado de los cables perimetrales en la base se hace mediante una placa de anclaje cuadrada con 3 bulones.

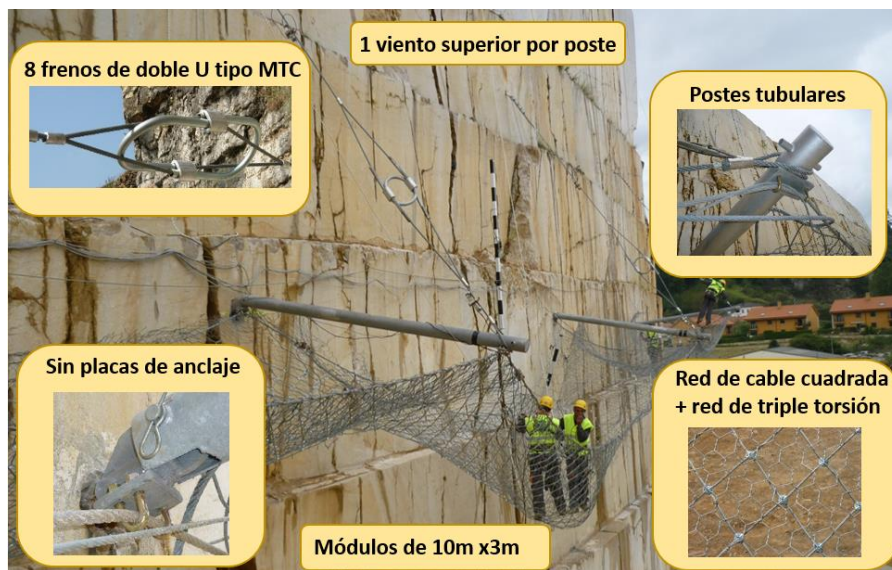


Figura 68. Componentes de la pantalla IBT-150.



Figura 69. Componentes de la pantalla IBT-500.

Tabla 16. Características de las pantallas IBT-150 e IBT-500 empleadas para la calibración de los modelos numéricos.

| | IBT-150 | IBT-500 |
|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Longitud | 10 | 10 |
| Altura | 3 | 4 |
| Red principal | Red de cables cuadrada L200 Ø8 | Red de cables cuadrada L200 Ø8 |
| Red secundaria | Malla alambre triple torsión | Malla alambre triple torsión |
| Tipo de postes | Tubular | HEB 160 |
| Cables perimetrales | Ø16 | Ø22 |
| Vientos laterales y superiores | 8Ø16 | 12Ø16 |
| Nº frenos | 8 | 12 |
| Nº pernos por anclaje | 1 | 3 |

7.1.2. Ensayos de campo

Los ensayos de las pantallas IBT-150 e IBT-500 se realizaron siguiendo las recomendaciones de la ETAG 027, descrita en el apartado 2.5.2. Entre el ensayo de tipo inclinado o el de tipo vertical se eligió la segunda opción. Esto permitió controlar la energía del bloque a lo largo del ensayo puesto que su movimiento se rige por las leyes de la cinemática de un cuerpo en caída libre,

$$E_{\text{impacto}} = \frac{1}{2} m \cdot v_{(t_0)}^2$$

donde E es la energía, m es la masa del cuerpo que impacta y v es la velocidad de dicho cuerpo en el instante del impacto. Todos los detalles referentes al bloque y energía de impacto se detallan en la Tabla 17.

Tabla 17. Parámetros de impacto y características de los bloques necesarios para los ensayos sobre las dos tipologías de pantalla.

| Tipo de pantalla | Ensayo | Masa (kg) | Velocidad (m/s) | Energía (kJ) | Lext (m) |
|------------------|--------------------------------------|-----------|-----------------|--------------|----------|
| IBT-150 | 1 ^{er} y 2 ^o SEL | 148 | 26 | 50 | 0,44 |
| | MEL | 504 | 25,6 | 165 | 0,67 |
| IBT-500 | 1 ^{er} y 2 ^o SEL | 460,5 | 27 | 167 | 0,65 |
| | MEL | 1429,5 | 27 | 521 | 0,95 |

3.5.1.2 Dispositivos de medida

La medida de fuerza en los cables se llevó a cabo utilizando sensores de fuerza comerciales como los descritos en el apartado 2.6.1. Además, se emplearon dos cámaras de alta velocidad capaces de capturar 100 fotogramas por segundo, y se colocaron en dos posiciones diferentes, una con un enfoque frontal y otra con un enfoque al lateral (Figura 70). Esto permitió obtener datos de velocidad del bloque, máxima elongación de la pantalla y ángulo entre los postes y la horizontal.



Figura 70. Cámaras de alta velocidad: cámara 1: vista frontal (izda.), y cámara 2: vista lateral (dcha.) en los ensayos de la pantalla IBT-500

Aunque en ambas pantallas también fueron obtenidos los valores de las cargas sufridas por algunos de los bulones de fijación de las placas de anclaje centrales, dichos registros de datos no fueron utilizados para la calibración de los modelos de pantalla completa. Esto es debido a que los modelos numéricos se implementarán simplificadamente evitando incluir la geometría de las placas de anclaje y los bulones, empleando en su lugar las condiciones de contorno en forma de restricción de los desplazamientos y rotaciones en la base del poste necesarios para poder inducir un comportamiento similar al real en los puntos de conexión poste-anclaje-bulones.

Todos los sensores se conectaron a un equipo de adquisición de datos DEWETRON DEWE 801 con 16 canales analógicos y 2 puertos firewire 400 para la conexión de las cámaras de video. La frecuencia de adquisición de datos en los ensayos fue de 5000 datos por segundo.

En la Figura 71 se indica la localización de los sensores en las 2 pantallas dinámicas estudiadas. Ya que solo se disponía de 16 canales para monitorizar los sensores, la distribución de los mismos varió ligeramente entre las dos pantallas:

En la pantalla IBT-150 se colocaron:

- ✓ 2 sensores de fuerza en la red de cables: N1 y N2
- ✓ 2 sensores de fuerza en el cable perimetral inferior: N3 y N4
- ✓ 2 sensores de fuerza en el cable perimetral superior: N5 y N6
- ✓ 2 sensores de fuerza en el viento superior izquierdo: N7 y N8
- ✓ 2 sensores de fuerza en el viento superior derecho: N9 y N10
- ✓ 4 canales para la célula de carga del bulón izquierdo: N11-N14
- ✓ 1 canal para la célula de carga del bulón derecho: N15
- ✓ 1 canal para las galgas extensométricas de la pieza de conexión: N16

En la pantalla IBT-500 se colocaron:

- ✓ 4 sensores de fuerza red de cables: N1, N2, N3 y N4
- ✓ 2 sensores de fuerza en el cable perimetral inferior: N5 y N6
- ✓ 2 sensores de fuerza perimetral superior: N7 y N8
- ✓ 2 sensores de fuerza en los vientos laterales (inf y sup) izquierdo: N9 y N11
- ✓ 2 sensores de fuerza en los vientos laterales (inf y sup) derecho: N10 y N12
- ✓ 2 sensores de fuerza en el viento superior izquierdo del poste derecho: N13
- ✓ 2 sensores de fuerza en el viento superior derecho del poste derecho: N14
- ✓ 2 canales para las galgas extensométricas adheridos a los 2 bulones: N15 y N16

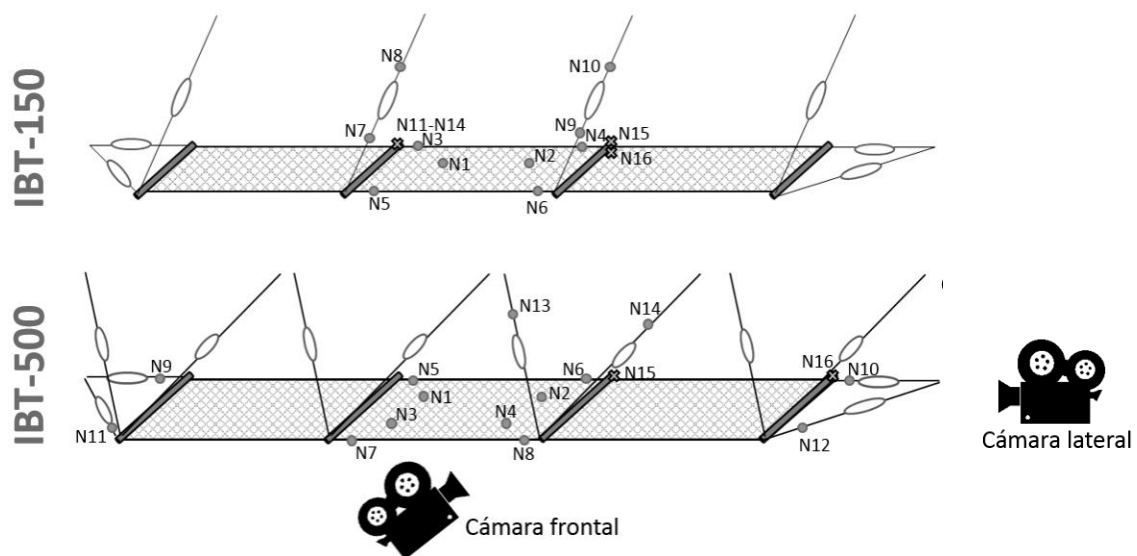


Figura 71. Ubicación de los sensores en las pantallas dinámicas IBT-150 e IBT-500. En la IBT150 se colocó una sola cámara lateral, mientras que en la IBT-500 se instaló una cámara frontal y otra lateral.

3.5.1.3 Resultados

Las dos pantallas superaron los criterios establecidos por la ETAG027, tanto para los ensayos de energía de servicio como los de energía máxima. En cuanto a los sensores de cable, estos funcionaron correctamente en todos los casos. En la Tabla 18 y Tabla 19 se encuentran los valores máximos registrados de todos los sensores de cable.

Tabla 18. Fuerza máxima registrada en cada uno de los sensores de cable instalados en la pantalla IBT-150

| | | SEL 1 | SEL 2 | MEL |
|--------|--------------------|--------------|--------------|-------------|
| Sensor | Tipo | Fuerza (kN) | Fuerza(kN) | Fuerza (kN) |
| N1 | Cable ϕ 8 mm | 1,88 | 2,75 | 13,12 |
| N2 | Cable ϕ 8 mm | 1,79 | 3,26 | 9,76 |
| N3 | Cable ϕ 16 mm | 64,72 | 54,42 | 120,51 |
| N4 | Cable ϕ 16 mm | 71,42 | 88,24 | 169,81 |
| N5 | Cable ϕ 16 mm | 74,59 | 91,10 | 111,23 |
| N6 | Cable ϕ 16 mm | 70,65 | 67,02 | 75,67 |
| N7 | Cable ϕ 16 mm | 46,69 | 46,83 | 76,51 |
| N8 | Cable ϕ 16 mm | 38,38 | 43,70 | 84,6 |
| N9 | Cable ϕ 16 mm | 47,06 | 48,10 | 120,71 |
| N10 | Cable ϕ 16 mm | 40,87 | 39,63 | 41,22 |

Tabla 19. Fuerza máxima registrada en cada uno de los sensores de cable instalados en la pantalla IBT-500

| | | SEL 1 | SEL 2 | MEL |
|--------|--------------------|--------------|--------------|----------------------|
| Sensor | Tipo | Fuerza (kN) | Fuerza (kN) | Fuerza (kN) |
| N1 | Cable ϕ 8 mm | 7,05 | 14,78 | 20,49 |
| N2 | Cable ϕ 8 mm | 11,98 | 17,94 | 27,55 |
| N3 | Cable ϕ 8 mm | 7,66 | 14,57 | 11 |
| N4 | Cable ϕ 8 mm | 10,74 | 24,78 | Sensor dañado |
| N5 | Cable ϕ 22 mm | 105,98 | 107,07 | 191,51 |
| N6 | Cable ϕ 22 mm | 110,47 | 131,23 | 202,08 |
| N7 | Cable ϕ 22 mm | 104,30 | 100,13 | 184,84 |
| N8 | Cable ϕ 22 mm | 126,71 | 136,04 | 244,28 |
| N9 | Cable ϕ 22 mm | 133,88 | 140,06 | 253,62 |
| N10 | Cable ϕ 22 mm | 82,10 | 86,56 | 300,82 |
| N11 | Cable ϕ 22 mm | 97,96 | 103,82 | 218,62 |
| N12 | Cable ϕ 22 mm | 123,26 | 219,66 | 311,09 |
| N13 | Cable ϕ 16 mm | 14,21 | 41,91 | 73,97 |
| N14 | Cable ϕ 16 mm | 47,45 | 56,07 | Sensor dañado |

Entre los valores de fuerza de los ensayos sobre la IBT-150 destaca el registrado por el sensor N4, situado en el cable perimetral más cercano al terreno, que alcanza un valor de 169 kN. Se trata de una fuerza ligeramente mayor que la máxima resistencia del cable, de 160 kN. Sin embargo, este no rompió, presumiblemente debido a que este tendría una resistencia superior a la media.

Observando los resultados de los sensores de cable en la pantalla IBT-500 existen dos aspectos destacables relacionados con el ensayo de energía máxima. El primero es el hecho de que los sensores N4 y N14 resultaron dañados y no fue posible obtener las mediciones de carga en el ensayo MEL. Por otra parte, aparecieron valores de fuerza excesivamente altos en algunos de los sensores, concretamente en N9, N10, N11 y N12. Acudiendo a los registros completos a lo largo del tiempo del ensayo se evidenció la presencia de ruido en la señal atendiendo a la gran cantidad de picos aislados y de valores altamente negativos.

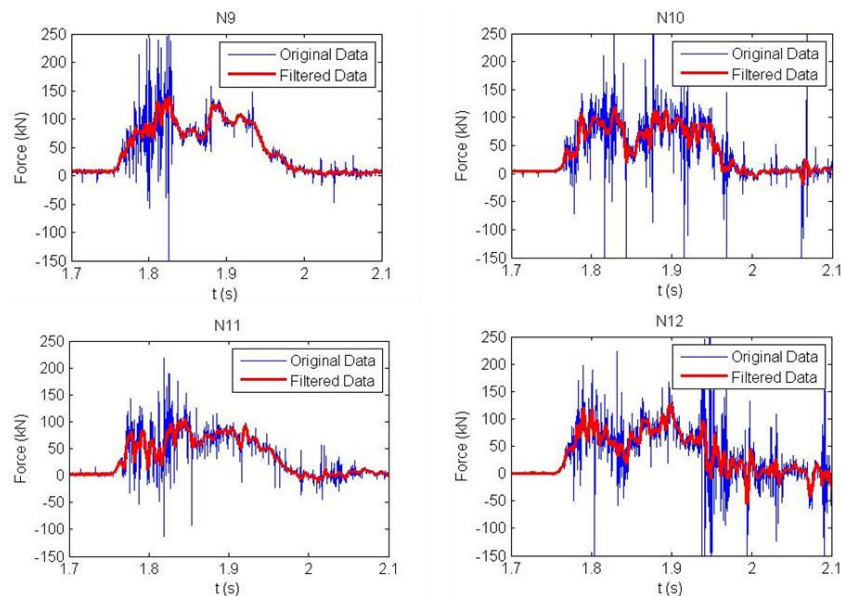


Figura 72. Filtrado del registro de fuerzas en los sensores N9, N10, N11 y N12 del ensayo MEL en la pantalla IBT-500

Por ello se realizó un filtrado, empleando el filtro Savitsky-Golay, obteniendo una reducción de los valores máximos de carga de entre un 45 y un 62% (Tabla 20).

Tabla 20. Datos máximos originales y filtrados de los sensores de cable N9-N12 instalados en la pantalla IBT-500

| | Valores máx Datos originales (kN) | Valores máx Datos filtrados (kN) | Diferencia (%) |
|-----|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|
| N9 | 256,40 | 139,19 | 45,71 |
| N10 | 300,82 | 119,02 | 60,43 |
| N11 | 218,61 | 107,27 | 50,93 |
| N12 | 329,27 | 127,04 | 61,41 |

El mismo filtro que el descrito anteriormente fue igualmente empleado en el resto de registros de carga, con el fin de eliminar ruidos de menor magnitud pero que igualmente podrían influir en los valores máximos de carga. A efectos de la futura calibración de los ensayos experimentales solo se emplearon los datos de los sensores situados en la parte izquierda de la pantalla, puesto que los sensores ubicados en posiciones simétricas presentan registros fuerza versus tiempo similares. En las Figura 73 y Figura 74 se muestran los registros de fuerza en las dos pantallas para los 3 impactos, los dos primeros a nivel de energía de servicio y el último a nivel de energía máxima.

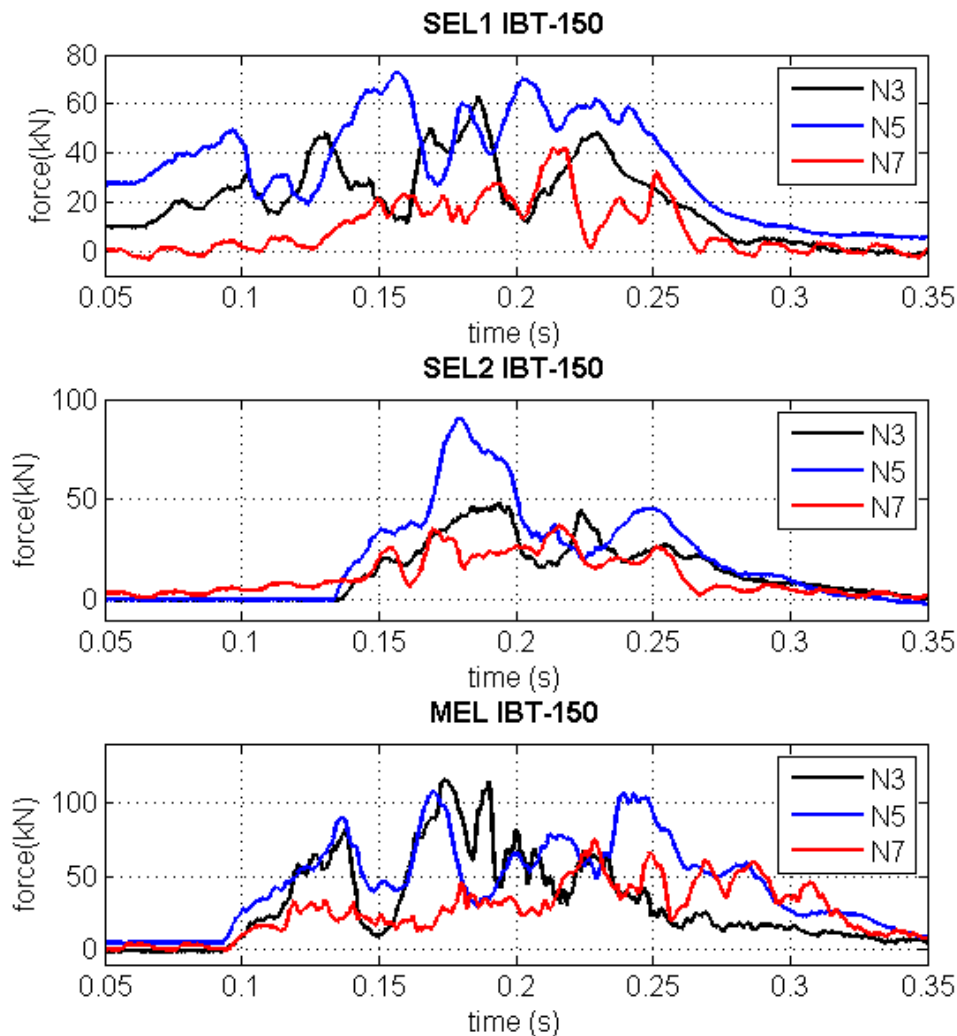


Figura 73. Registro de fuerza en los cables perimetrales y viento superior en) 1st SEL test IBT150, b) 2nd SEL test IBT150 and c) MEL test IBT150

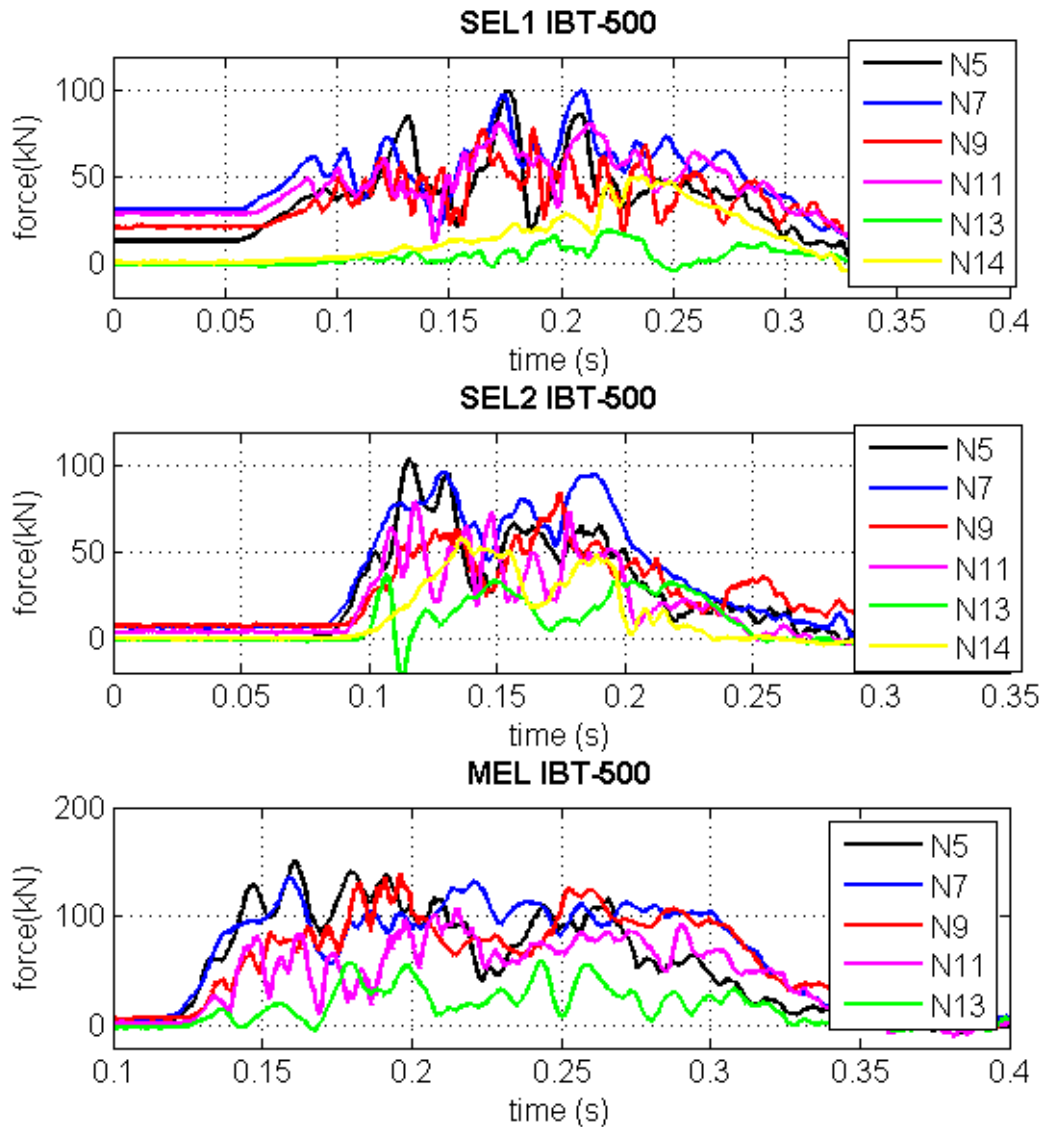


Figura 74. Registro de fuerza en los cables perimetrales, vientos laterales y vientos superiores en a) 1st SEL test IBT500, b) 2nd SEL test IBT500 and c) MEL test IBT500

Un punto por destacar tras el análisis visual de los ensayos es el comportamiento del cosido de la red de cables cuadrada a los cables perimetrales inferior y superior. En otros diseños de pantallas en los que la red se conecta mediante grilletes metálicos a los cables perimetrales, suele aparecer lo que se llama “efecto cortina”, denominado así porque describe el deslizamiento de los grilletes a lo largo del cable perimetral consiguiendo que la red se desplace hacia la zona de impacto. Este comportamiento generalmente conlleva una mayor flecha de la pantalla pero también incrementa el “braking time” o tiempo de aplicación de la carga, por lo que se reduce el valor de carga máxima que sufre la estructura. Pese a que la conexión en la IBT-150 e IBT-500 se realiza mediante el

cosido con un cable auxiliar no se trata de una conexión rígida ya que también aparece el efecto cortina. En la Figura 75 se ve que la malla se ha desplazado hacia el centro del paño central (el bloque ya ha sido quitado de la red) pues los vértices de los cuadros de la retícula se encuentran más agrupados en la parte central que en los laterales. Queda así corroborado el hecho de que la utilización de una unión rígida entre la malla y los cables perimetrales no es correcta y que se deberán de emplear leyes de Coulomb con rozamiento para simular dicho comportamiento.



Figura 75. Desplazamiento de la red hacia el punto de impacto, lo que evidencia un comportamiento tipo “efecto cortina”.

3.5.1.4 Simulación numérica mediante elementos finitos

La implementación de un modelo numérico capaz de definir correctamente el comportamiento de las pantallas dinámicas que se quieren analizar conlleva enfrentarse a un modelo altamente dinámico en el que aparecen los tres tipos posibles de no linealidades: contactos con fricción, la plasticidad del material y la no linealidad geométrica (grandes desplazamientos).

Los cables se simulan mediante elementos unidimensionales sin rigidez a flexión (truss). Como propiedades del material se introduce una ley elastoplástica multilineal distinta para cada tipo de cable (de diámetros 8, 16 y 22 mm). Estos datos se obtienen a partir de ensayos de tracción realizados en el laboratorio (Figura 76). Estas curvas deberán ser transformadas según el esquema de la Figura 48 para su introducción en el programa. Las áreas equivalentes para los cables de diámetro 8; 16 y 22 mm son de 28; 111 y 227 mm² respectivamente.

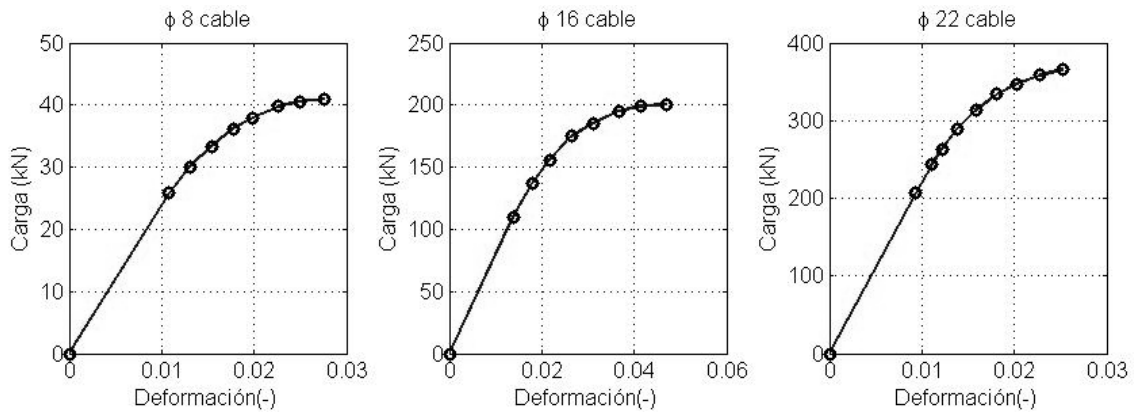


Figura 76. Curvas fuerza-deformación características de cada tipo de cable. Los puntos señalados con un círculo negro son los seleccionados para definir la zona plástica del material.

Con el objetivo de obtener el comportamiento de la pantalla frente a la rotura de uno o varios cables, se decide definir un modelo de daño para los cables de diámetro 8 y 16 mm.

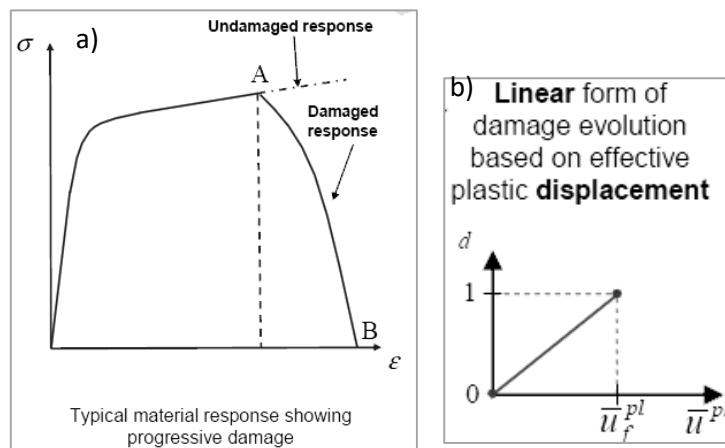


Figura 77. Curvas referentes al modelo de daño introducido, a) curva tensión-deformación, y b) evolución del daño

En la Figura 77a se representa la curva tensión-deformación del material. El tramo desde el origen hasta el punto A representa el material no dañado. A partir de este punto y hasta el punto B se representa la progresión del daño, hasta que al llegar a B, el elemento que contiene este material deja de recibir y transmitir tensiones. En la figura 75b se muestra la evolución del daño, que se puede representar mediante la curva parámetro de daño-desplazamiento plástico. En el instante que el daño es igual a 1 el elemento deja de transmitir esfuerzos al resto del sistema.

Los datos de comportamiento elástico, plástico y de daño para cada tipo de cable empleado se detallan en la Tabla 21.

Tabla 21. Parámetros de comportamiento del material para los cables de diámetro 8 mm; 16 mm y 22 mm.

| | Cable d8 | | Cable d16 | | Cable d22 | |
|-------------------------|--------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------|
| Comportamiento elástico | Módulo de Young (MPa) | | Módulo de Young (MPa) | | Módulo de Young (MPa) | |
| | 85864 | | 75792 | | 98901 | |
| Comportamiento plástico | Plastic log strain (-) | True stress (MPa) | Plastic log strain (-) | True stress (MPa) | Plastic log strain (-) | True stress (MPa) |
| | 0.0000 | 932 | 0.0000 | 1007 | 0.0000 | 918 |
| | 0.0003 | 1086 | 0.0012 | 1254 | 0.0003 | 1174 |
| | 0.0012 | 1210 | 0.0026 | 1432 | 0.0007 | 1288 |
| | 0.0023 | 1314 | 0.0048 | 1618 | 0.0015 | 1402 |
| | 0.0036 | 1381 | 0.0080 | 1720 | 0.0028 | 1497 |
| | 0.0054 | 1455 | 0.0121 | 1820 | 0.0042 | 1561 |
| | 0.0074 | 1483 | 0.0160 | 1867 | 0.0062 | 1616 |
| | 0.0097 | 1506 | 0.0209 | 1891 | 0.0082 | 1652 |
| Daño | Deformación de fractura | | Deformación de fractura | | Deformación de fractura | |
| | 0.0097 | | 0.0209 | | 0.0082 | |
| | Desplazamiento en el fallo (m) | | Desplazamiento en el fallo (m) | | Desplazamiento en el fallo (m) | |
| | 0.000001 | | 0.000001 | | 0.000001 | |

Para comprobar la validez del modelo de material introducido en Abaqus se simulan los ensayos de tracción de los cables de diámetro 8 mm; 16 mm y 22 mm. Un lateral del cable se fija de manera que se restringen todos los desplazamientos se le aplica una velocidad 0,05 m/s en el extremo opuesto. Las características del material introducidas para cada dimensión de los cables se encuentran en la Tabla 21. En la Figura 78 se presenta la comparativa de fuerza frente a deformación en los ensayos de tracción experimentales y las simulaciones numéricas. En las tres gráficas se muestra una perfecta correspondencia entre el comportamiento elástoplástico numérico y experimental de los cables, así como su punto de rotura, a partir del cual el modelo numérico se descarga y deja de transmitir tensiones, tal y como se representa por la línea aproximadamente vertical localizada tras el punto de carga máxima.

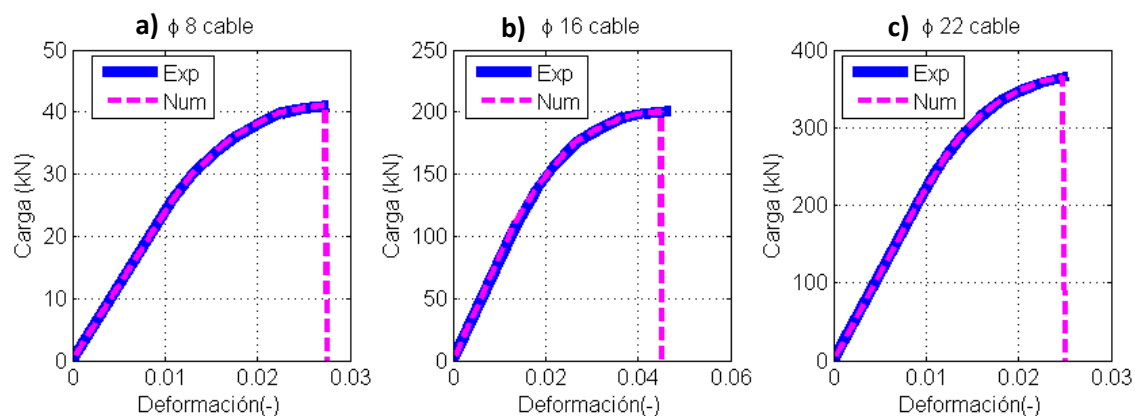


Figura 78. Curvas Fuerza-Deformación experimental y numérico a) en un cable de diámetro 8 mm, b) en un cable de diámetro 16 mm y c) en un cable de diámetro 22 mm.

Los elementos disipadores de energía se simplifican mediante el uso de conectores de tipo axial (Figura 79a). Este tipo de conector relaciona 2 nodos pertenecientes a elementos distintos restringiendo únicamente su desplazamiento en la dirección del eje que une los dos nodos. Dicha restricción puede ser definida por el usuario, y en este caso se ha utilizado la ley carga-desplazamiento de la Figura 79b, que corresponde al comportamiento real de los disipadores de energía tipo MTC (Castro-Fresno et al. 2009).

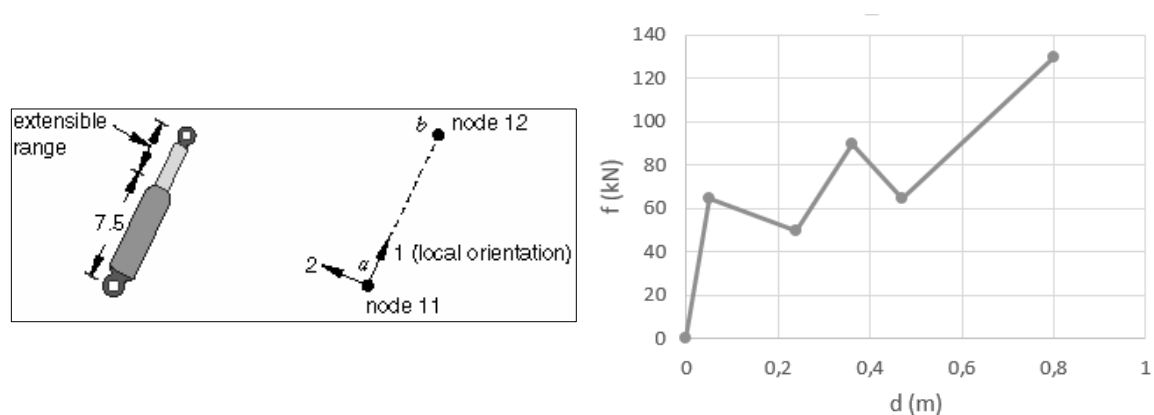


Figura 79. Implementación de los frenos en el modelo: a) representación esquemática de un conector de tipo axial, y b) curva fuerza/desplazamiento del freno.

Los postes fueron simulados empleando elementos tipo barra con rigidez a flexión, introduciendo en cada caso el perfil real de los mismos; esto es, un perfil tubular de diámetro exterior 114,3 mm y espesor 4 mm para la pantalla IBT-150 y un perfil HEB 160 en la pantalla IBT-500.

La conexión entre los postes de los extremos y los laterales de la red de cables se realiza acoplando los grados de libertad de los mismos (Figura 80).

La red de cables se mantiene erguida gracias a que se encuentra cosida a los cables perimetrales superior e inferior. Esto permite el llamado “efecto cortina”; es decir, el deslizamiento de la red de cables respecto de los cables perimetrales, tendiendo a desplazarse hacia el lugar donde se produce el impacto del bloque. Para conseguir este comportamiento se han creado unos elementos a modo de grilletes que conectan cada uno de los cuadros del contorno con el cable perimetral correspondiente (Figura 81), y que, a diferencia de los anteriormente descritos, tienen forma de anillo, y están discretizados con elementos unidimensionales rígidos, por lo que no absorben energía por deformación.

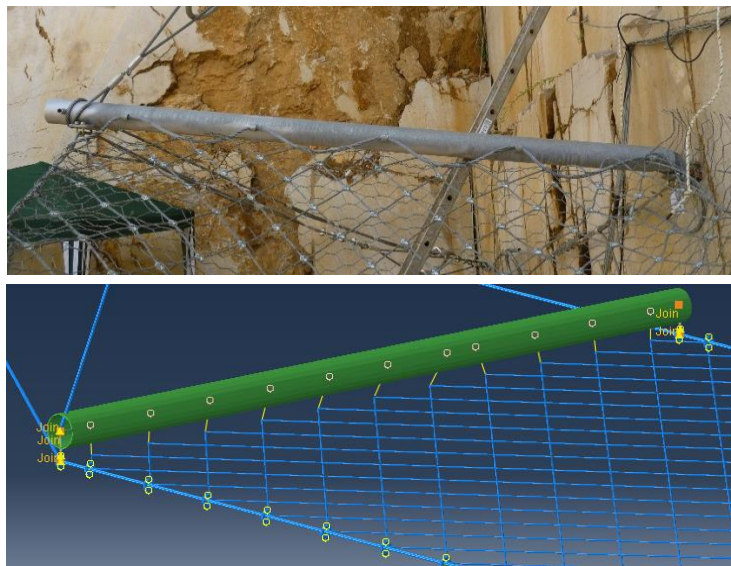


Figura 80. Con el fin de reproducir el cosido lateral de la pantalla (imagen superior) se realiza el acoplamiento de todos los grados de libertad de los laterales de la red de cables y los nodos de los postes (imagen inferior).

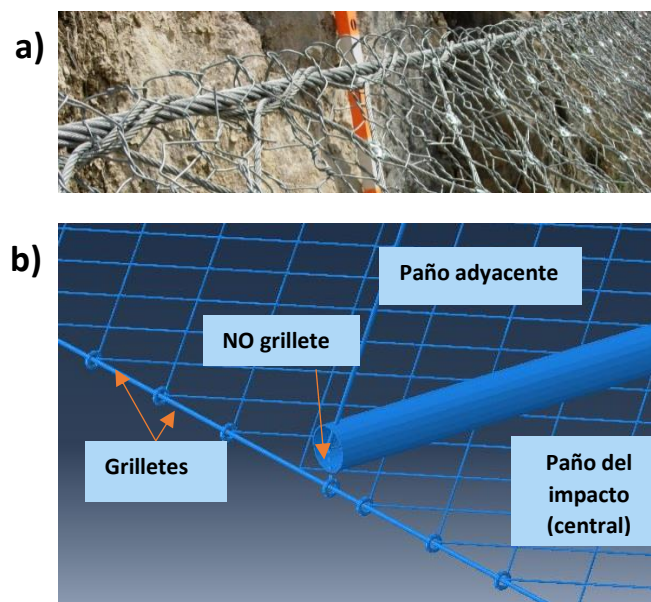


Figura 81. Simplificación del cosido de la red de cables a los cables perimetrales (a) mediante la adición de piezas circulares rígidas a modo de grilletes (b).

Las interacciones entre elementos del modelo se implementaron a través de un “Contacto General”. El contacto tangencial se definió como tipo “Penalty” (Abaqus Analysis User’s Manual) y con el fin de obtener el modelo que mejor reproduce el comportamiento real, se realizaron cálculos con distintos coeficientes de rozamiento. Los coeficientes probados en la interacción cable perimetral-grilletes fueron 0.2; 0.4 y 0.6. Mientras que el valor de 0.6 se tradujo en un comportamiento excesivamente rígido de la pantalla con fallos prematuros, un coeficiente de 0.2 causa un efecto cortina excesivo que no se observa experimentalmente y da lugar a flechas mayores a las reales. Tomando el valor intermedio (de 0.4) se comprueba que es el más preciso en resultados tanto de flecha como de carga en los cables. Siguiendo el mismo procedimiento, la interacción entre los cables perimetrales y los grilletes guía de los postes también es evaluado, tomando valores entre 0.2 y 0.4. Finalmente se selecciona un valor de 0.2 pues valores mayores provocan concentraciones de tensiones en el cable en su paso por el grillete que provocan su ruptura. Por último, se toma como coeficiente de rozamiento entre el bloque y la red de cables un valor de 0.4, pues ha sido usado y corroborado en numerosas ocasiones por distintos autores (Gentilini et al., 2012 y Mentani et al., 2016).

Los bloques de hormigón se modelizaron como cuerpos rígidos analíticos con la misma geometría que la de los bloques reales (Tabla 17).

En la Figura 82 se muestra una vista general del modelo de elementos finitos de la pantalla IBT500.

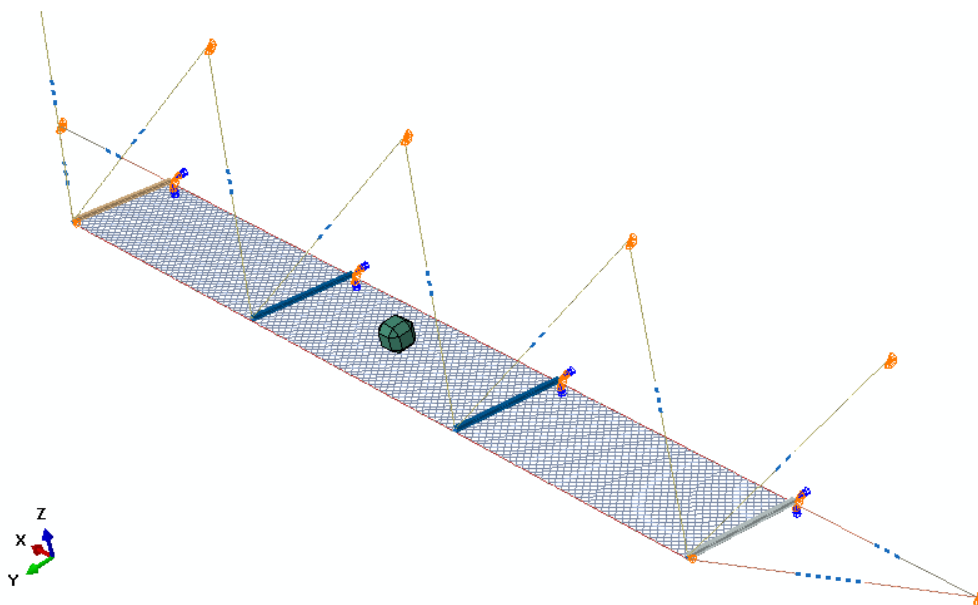


Figura 82. Apariencia final de la pantalla IBT-500

El modelo se dividió en 3 pasos de carga. En el primer intervalo, de 1 segundo, se impone a todos los elementos de la pantalla la aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2) para proporcionar a la barrera su forma inicial previa al impacto (que en inglés se denomina “sag-shape”); además, se aplica una pretensión a los cables laterales en los modelos de impacto SEL. En el segundo paso, de 0.003 s, se aplica al bloque la velocidad inicial (Tabla 17). El bloque se coloca solo varios milímetros sobre la pantalla. Finalmente, en el tercer paso de duración 0.6 segundos, se añade la gravedad al bloque y se simula el impacto.

Resultados

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en las 2 pantallas al realizar simulaciones del primer ensayo SEL y del ensayo MEL (Figura 83, Figura 86). Las curvas negras muestran los resultados experimentales de carga en los cables obtenidos por los sensores, mientras que las azules representan las cargas obtenidas numéricamente en los elementos del modelo en los que se encontrarían dichos sensores.

Únicamente se utilizaron los registros de los sensores de fuerza para comparar los valores reales de los ensayos con las simulaciones numéricas. Los registros extraídos de las galgas extensométricas en los anclajes no se consideraron ya que los valores resultaron ser irrealmente bajos. Además, no se realizó una modelización realista de dicha zona ya que no se consideró como un punto crítico del kit.

Debido a dificultades en el modelo relacionadas con los contactos en impactos sucesivos, el segundo impacto SEL no fue analizado, y el impacto MEL se simuló con una barrera nueva no deformada. Con esta simplificación se espera encontrar algunas diferencias relacionadas con el tiempo total de aplicación de la carga en el impacto MEL, puesto que observando las Figura 73 y Figura 74 el efecto de impactos consecutivos rigidiza la estructura. Esto se aprecia claramente en la diferencia de tiempo en el que la carga está aplicada en cada uno de los sensores para ambos impactos SEL y MEL. A pesar de este efecto, la simulación de un impacto MEL sobre un modelo “nuevo” dará una idea de las fuerzas máximas, puesto que los impactos tipo SEL no inducen plastificación en los cables, y los frenos apenas han entrado en funcionamiento y están lejos de agotar su mecanismo de disipación.

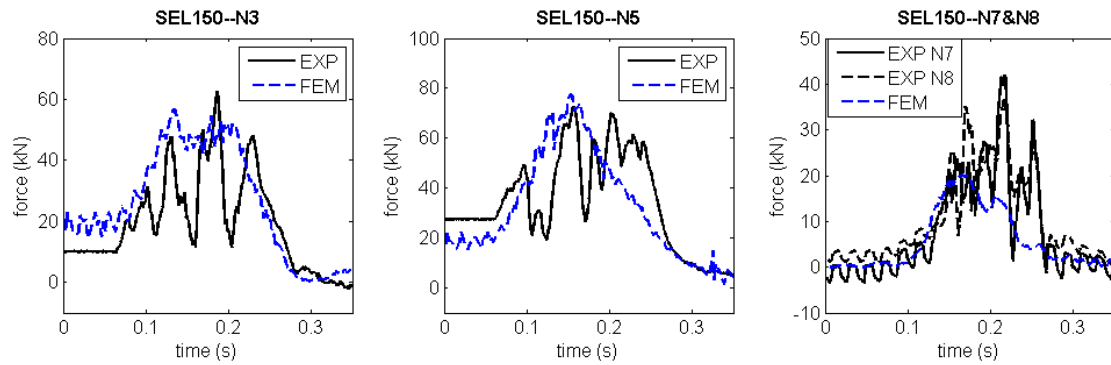


Figura 83. Gráficas Carga-tiempo del primer ensayo SEL en la pantalla IBT-150. Comparativa entre los ensayos experimentales y la simulación numérica.

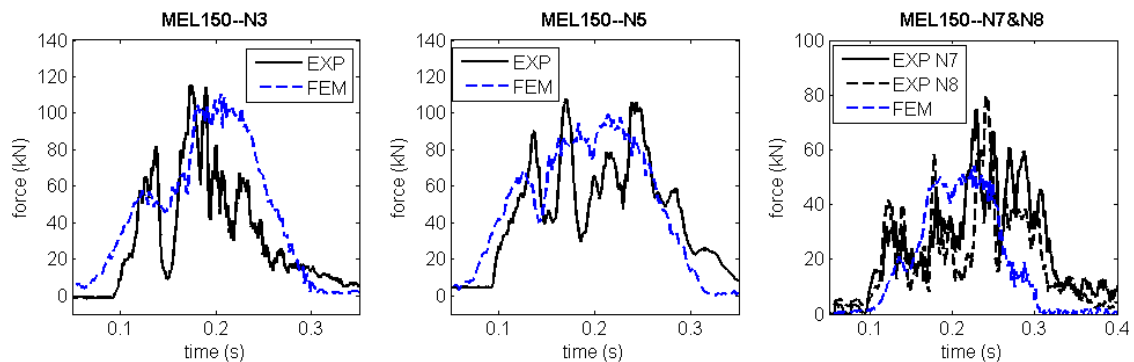


Figura 84. Gráficas Carga-tiempo del primer ensayo MEL en la pantalla IBT-150. Comparativa entre los ensayos experimentales y la simulación numérica.

En general, se observa una buena concordancia entre los ensayos experimentales y los numéricos. Las discordancias en las curvas de los vientos superiores de la pantalla IBT-150 (Sensores N7 y N8) pueden proceder de las grandes diferencias de comportamiento de los frenos MTC aun habiéndoles aplicado la misma presión de apriete (Castro-Fresno et al. 2009). El origen de esta variabilidad en el comportamiento de los frenos puede deberse a que el proceso de montaje de las piezas del freno se realiza de forma manual, con lo que cualquier pequeña diferencia de la posición de los tubos en U al colocar los casquillos y aportarles presión provocará que el deslizamiento sea o no simétrico influyendo por tanto en la curva de comportamiento del freno. Las mayores diferencias entre los modelos y el caso real se encuentran en el cable perimetral más cercano al terreno (N5). El aflojamiento del cable de cosido en las inmediaciones de las bases de los postes puede ser el motivo de tal discrepancia, ya que aunque en la realidad puede darse esta circunstancia, no ocurre en el modelo numérico, que posee un método simplificado de conexión red-cable. La única manera que el modelo tiene reducir la concentración de tensiones en los puntos de registro de los cables perimetrales es mediante el fallo de los cables de la retícula que se encuentran conectados al perimetral mediante los llamados “grilletes”.

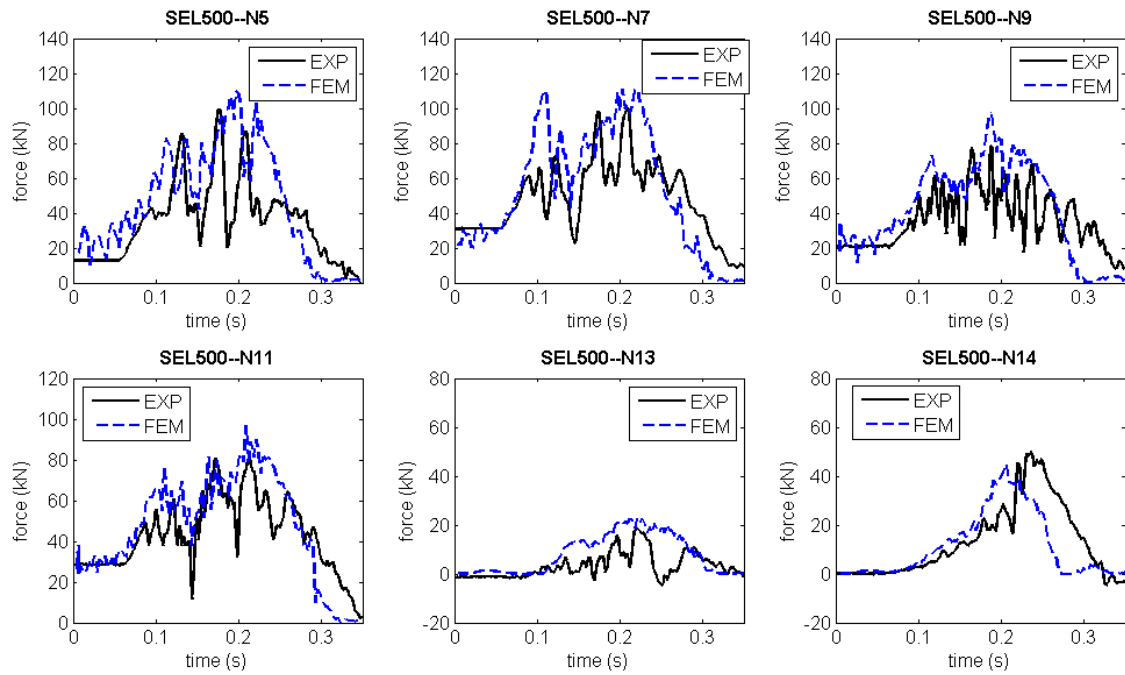


Figura 85. Gráficas Carga-tiempo del primer ensayo SEL en la pantalla IBT-500. Comparativa entre los ensayos experimentales y la simulación numérica.

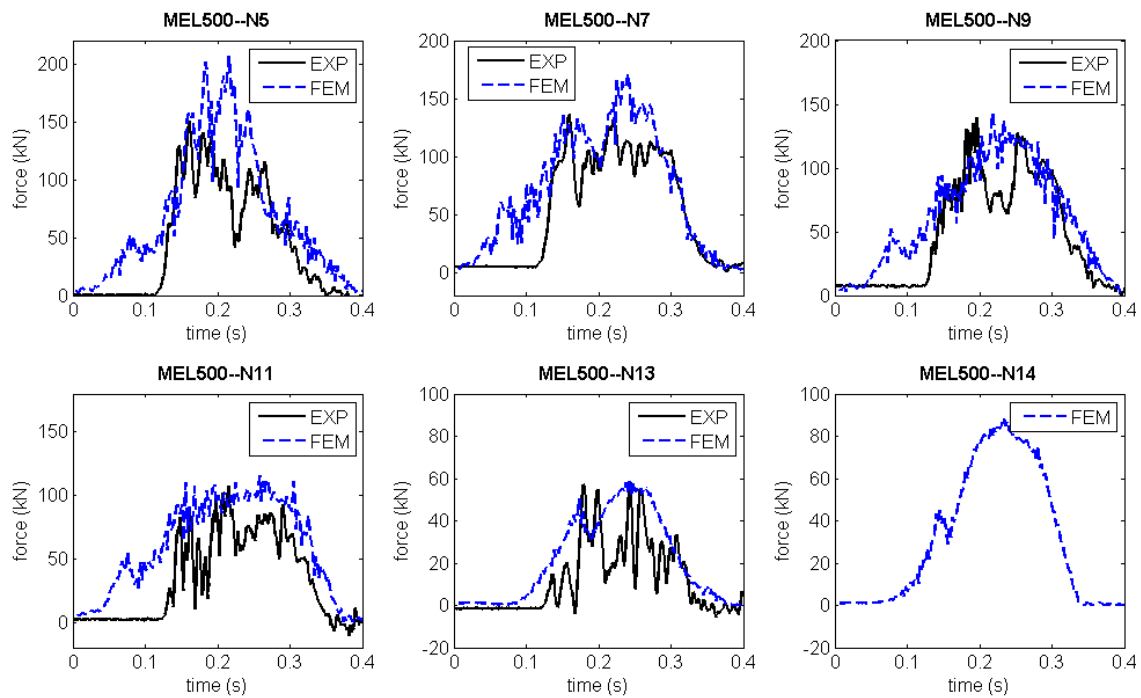


Figura 86. Gráficas Carga-tiempo del primer ensayo MEL en la pantalla IBT-500. Comparativa entre los ensayos experimentales y la simulación numérica.

En el ensayo MEL de la red IBT-500, las fuerzas debidas al impacto del bloque se comienzan a transmitir antes que en el modelo numérico (Figura 86). Esto puede deberse a que la estructura real tiene una mayor altura nominal que en el modelo numérico, o bien que esta es ligeramente más rígida.

En ambas pantallas la elongación máxima fue solo comparada en el primer impacto con energía de servicio (SEL), ya que el ensayo con energía máxima está afectado por la deformación permanente inducida por los dos ensayos SEL anteriores. Los resultados se muestran en la Figura 24, donde se comprueba que la dispersión máxima entre los ensayos experimentales y los modelos numéricos es del 8%.

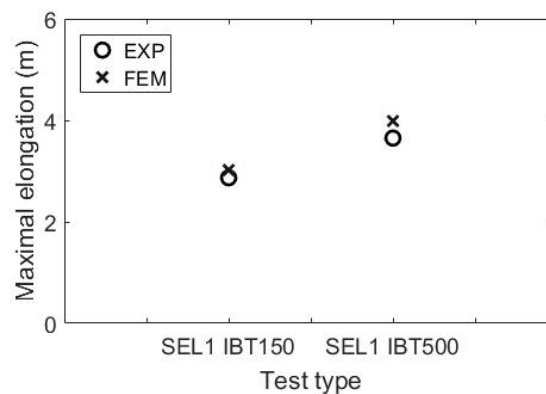


Figura 87. Máxima elongación de los ensayos SEL (primer impacto) y MEL. Comparativa entre ensayos experimentales y simulación numérica.

3.5.2 Simulación de una pantalla con la membrana MT15000

Para estudiar el comportamiento de las redes con unas condiciones de contorno lo más reales posibles se emplea la estructura de la pantalla IBT150, ya calibrada, como base sobre la cual se harán las modificaciones para cada tipo de red. Esto significa que se conserva la estructura de postes, vientos superiores y laterales, cables perimetrales y sobre esto se instalan las redes de intercepción cuadrada, triangular en las dos direcciones y la MT15000. Por tanto, los modelos de pantalla completa constan de 3 paños de 10 m de longitud y 3 metros de ancho cada uno, y cada poste estará sujeto por un viento superior. El único elemento que desaparece respecto a la IBT150 son los frenos, puesto que lo que se pretende es estudiar la absorción de energía de la malla siendo preferible la eliminación de la influencia de estos dispositivos en la respuesta de las redes frente al impacto. Debido a la eliminación de los frenos, se comprueba que el cable de diámetro

16 mm presente en los perimetrales, vientos superiores y laterales no es suficientemente resistente y llega a rotura durante el impacto, por lo que se sustituye por uno de diámetro 22 mm, con la curva tensión deformación de la Figura 76, y un área equivalente de 227 mm².

3.5.2.1 Sistema de conexión malla-cable perimetral

En las redes triangulares en las dos orientaciones y cuadrada la conexión entre cada retícula de la red y el cable perimetral se realiza de forma similar a los de las pantallas IBT150 e IBT500; es decir, a través de un grillete y con un coeficiente de rozamiento $\mu = 0,4$, valor que se encontró como el más adecuado y el que mejor reproduce el sistema de cosido real.

Sin embargo, las condiciones de contorno de la malla MT15000 son ligeramente distintas a las de las redes de cables. El hecho de que la retícula de la malla sea tan pequeña hace imposible el cosido de cada una de las espiras al cable perimetral con cables de diámetro 10 u 8 mm, que son los que comúnmente se usan para este fin. Usando cables de menor diámetro se reduciría considerablemente la carga de rotura. Una alternativa planteada es el uso de grilletes para unir cada retícula al cable perimetral, pero se descarta inmediatamente debido al alto coste que supondría por tener que colocar un gran número de ellos. La solución adoptada pasa por la colocación de un cable premontado de diámetro 10 mm en cada lateral de la red de cables. El cable de cosido pasará cada 3 espiras y, gracias al cable premontado, se distribuirá uniformemente al resto de las espiras del contorno para que no suceda que unas sufran más que las otras (Figura 88).

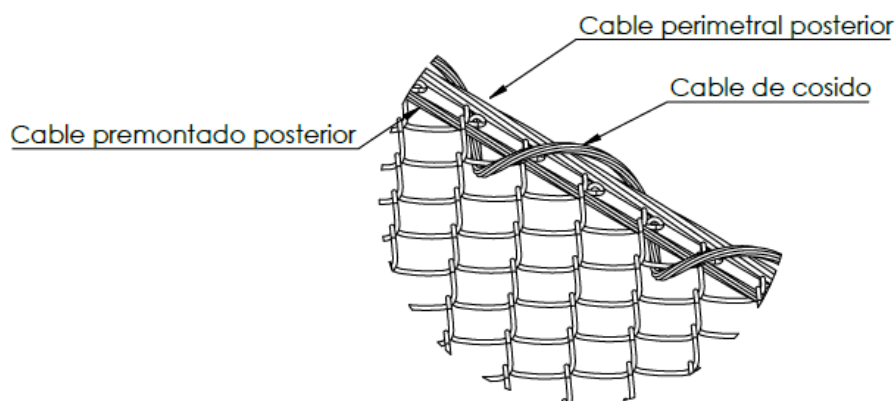


Figura 88. Croquis de unión del cable perimetral de la pantalla con la malla MT15000 mediante la incorporación de un cable premontado y cable de cosido.

En las simulaciones de la pantalla con malla MT15000, como en los modelos anteriores, el cable de cosido se simplifica empleando anillas circulares. Cada 3 espiras del contorno de la retícula las

anillas abrazan el cable perimetral, el cable premontado y la misma espira. En las espiras intermedias se colocan también anillas para conectarlas con el cable premontado, pero no con el cable perimetral. La geometría resultante se muestra en la Figura 89.

Puesto que no se tienen datos reales con los que calibrar el coeficiente de rozamiento entre el cable perimetral y los grilletes que ejercen de cable de cosido, se presupone un valor similar al encontrado en la calibración de las pantallas IBT150 e IBT500; es decir 0,4.

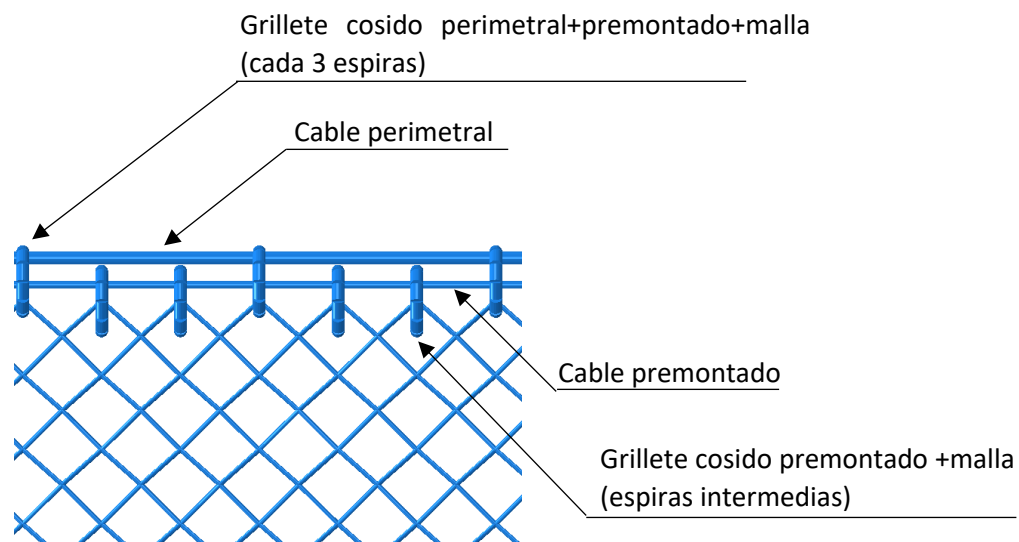


Figura 89. Geometría introducida en el software Abaqus para la conexión de la malla con el cable perimetral utilizando anillas circulares.

3.5.2.2 Tamaño y forma de los bloques

La selección de la forma del bloque que impactará sobre las membranas tiene una gran importancia en los resultados finales.

La guía ETAG 027 recomienda utilizar bloques de hormigón con forma poliédrica. Sin embargo, las simulaciones numéricas que se mostrarán a continuación se realizan empleando un bloque esférico de igual densidad y masa al equivalente poliédrico.

Esta decisión se ha tomado en base a que cuando los bloques interactúan con la red de cable en el impacto las aristas vivas del poliedro provocan concentraciones locales de tensiones en los cables y/o alambres de la malla de intercepción implementada en el modelo que no corresponden a comportamientos físicos reales sino artificios numéricos. Debido a esto las energías máximas

obtenidas utilizando el bloque poliédrico son mucho menores que las obtenidas con el esférico, y a su vez dependientes del ángulo de impacto entre el bloque y la malla.

Para demostrar esta afirmación se ha utilizado un modelo de pantalla de 3 paños de 10 metros de longitud y 3 metros de alto en la que la red de intercepción es la malla MT15000. Bloques de 500 kg y de dos formas distintas, esférica y poliédrica, impactan sobre dicha pantalla, con el objetivo de obtener la energía de rotura de la red. A su vez, para observar la influencia de la orientación del bloque en el impacto, se impondrán 3 ángulos iniciales distintos al bloque poliédrico (0° , $22,5^\circ$, $-22,5^\circ$ y 45°). Mientras que utilizando un bloque esférico la pantalla es capaz de resistir 210 kJ, este valor se reduce entre un 33,3 y un 41,3% con el bloque poliédrico (Tabla 22).

Tabla 22. Tipo de bloque, orientación y energía máxima resistida por la pantalla para cada caso.

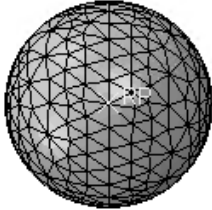
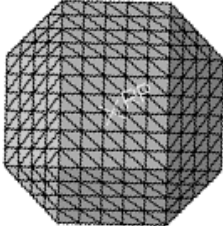
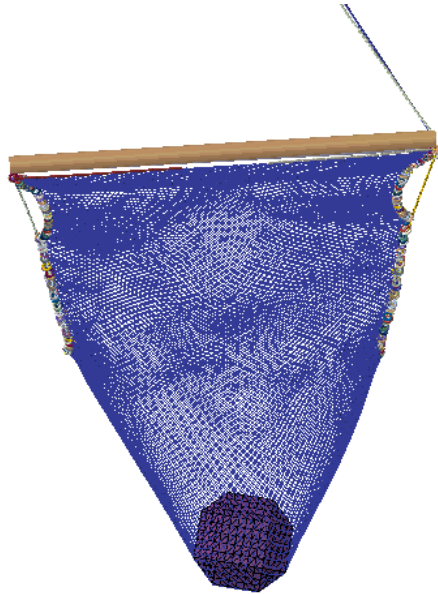
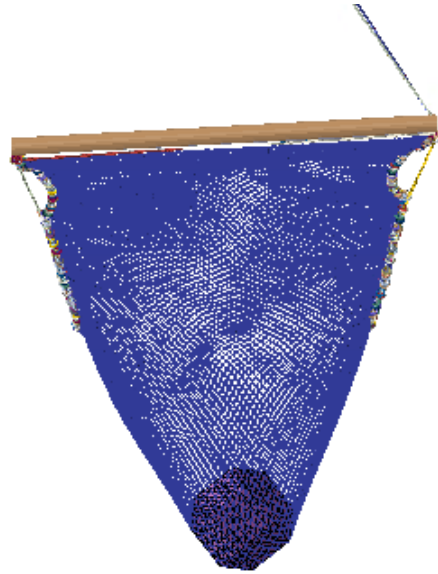
| Tipo de bloque | | Orientación | Energía máxima (kJ) |
|----------------|---|---------------|---------------------|
| Esférico |  | - | 210 |
| Poliédrico |  | 0° | 140,5 |
| Poliédrico | | $22,5^\circ$ | 123,2 |
| Poliédrico | | $-22,5^\circ$ | 140,5 |
| Poliédrico | | 45° | 134 |

Figura 90. Perfiles de la pantalla dinámica en los instantes de máxima flecha para distintos ángulos iniciales del bloque poliédrico

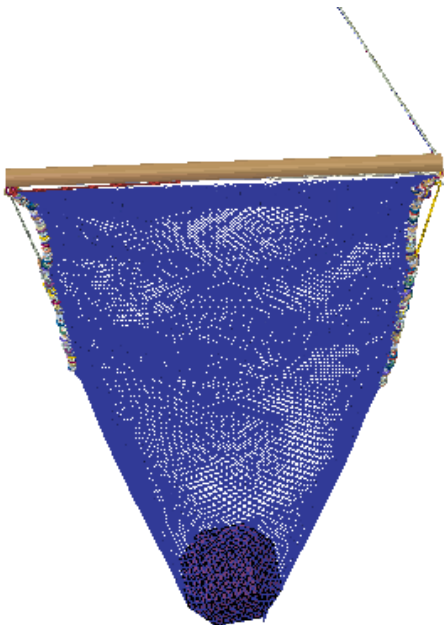
a) 0°



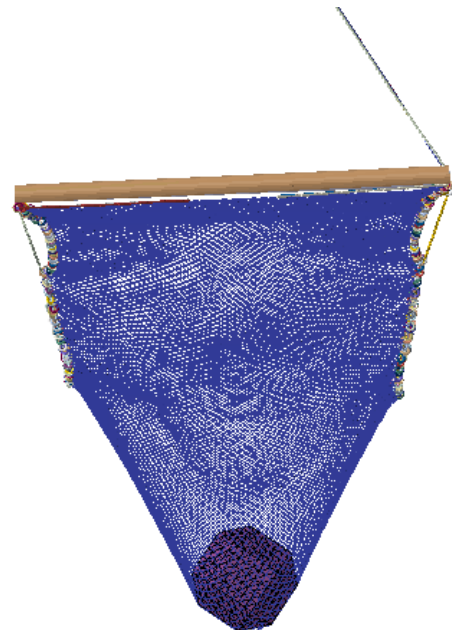
b) 45°



c) $22,5^\circ$



d) $-22,5^\circ$



Las únicas simulaciones en las que se empleó un bloque poliédrico fueron las de las pantallas IBT150 e IBT500. Sin embargo, los ensayos no se vieron influenciados por la geometría del bloque puesto que estas no fueron llevadas hasta rotura. Las simulaciones de las pantallas IBT150 e IBT500 se realizaron posteriormente siendo impactadas con un bloque esférico y se obtuvieron diferencias en los registros de cargas de 15 kN como máximo.

Con el fin de evaluar la influencia del tamaño del bloque en la energía de impacto, se utilizarán 4 bloques de diferentes pesos y dimensiones. Las masas de los bloques son 500 kg; 750 kg; 1000 kg y 1250 kg. Empleando una densidad del hormigón de 2500 kg/m³, los radios resultantes de cada uno de los bloques son 0,3627 m; 0,4152 m; 0,457 m y 0,4923 m respectivamente.

3.5.2.3 Resultados

Al igual que en el análisis de un solo paño de red, los resultados de las redes triangulares en las dos direcciones perpendiculares y la malla MT15000 se compararán con los resultados obtenidos para la red cuadrada de 200 mm de lado de retícula con cable de diámetro 8 mm.

La gráfica de la Figura 92 muestra la energía resistida por las pantallas para los cuatro bloques empleados en el estudio. Una energía mayor a la indicada en la gráfica para cada caso se traduce en la ruptura de la membrana, generándose un orificio en esta por donde el bloque se cuele. En la Figura 92 se observa que no existe una dependencia de la energía capaz de absorber por la pantalla para cada tipo de red o malla en función del tamaño y masa del bloque, sino que se mantiene prácticamente constante en todos los casos, con una diferencia máxima de 30 kJ que se produce en el caso de la malla MT15000. Se sabe a ciencia cierta que esta tendencia no se mantiene constante sea cual sea el tamaño del bloque, sino que existen unos límites inferior y superior a partir de los cuales la energía que la pantalla es capaz de resistir disminuye drásticamente. El límite inferior correspondería al tamaño del bloque tal que impactase solo sobre un cuadro de la retícula y no se apoyase en ninguno más a lo largo de todo su recorrido de frenado. En ese caso se produciría una concentración de tensiones en los cables de dicho cuadro, que antes de transmitir las cargas al resto de cables y de componentes del sistema se romperían, dejando al bloque pasar a través de la red. Esto es lo que se llama efecto bala, y ya ha sido estudiado por otros autores (Spadari et al., 2012). Es por ello por lo que no se ha estudiado en esta tesis. Por otra parte, tamaños de bloque muy grandes también provocan una reducción en la energía capaz de absorber por una malla o red. Al aumentar la masa, y por tanto el tamaño del bloque se llegaría a un punto en que la pantalla, ni siquiera en una situación de velocidad de impacto muy baja podría soportar las cargas que provocan el peso del bloque. Es por esto por lo que incluso la ETAG027, guía para la ejecución de ensayos dinámicos sobre las pantallas, establece un tamaño máximo del bloque igual de un tercio de la anchura del paño consiguiendo así evitar esta situación.

Ya que en este trabajo se pretendía estudiar impactos de bloques de tamaños intermedios, el tamaño máximo del bloque es de 1 metro de diámetro, justamente un tercio del ancho del paño simulado.

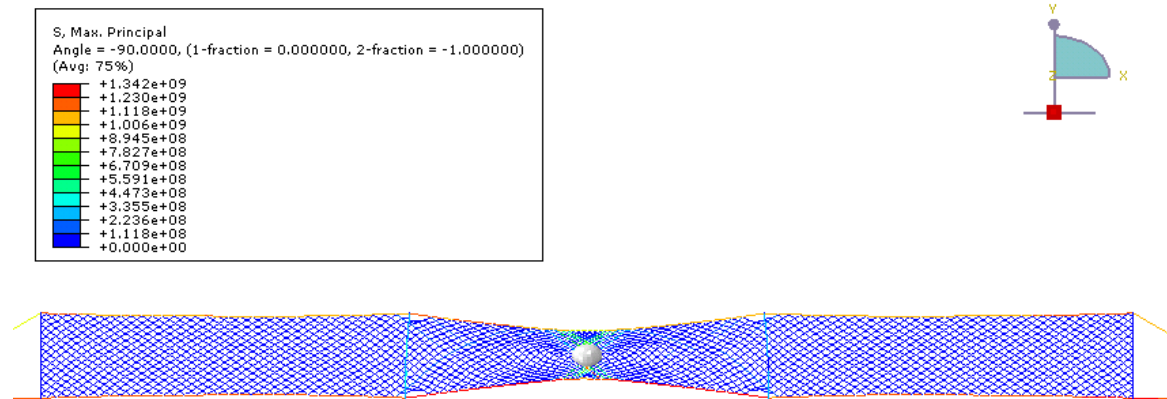


Figura 91. Vista en planta del impacto de un bloque contra una pantalla dinámica con red de cable cuadrada.

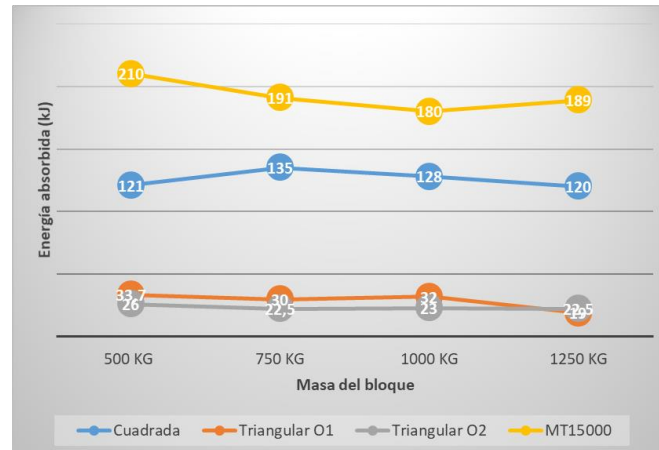


Figura 92. Energía resistida por las pantallas con diferentes mallas en función de la masa y, por tanto, tamaño, del bloque.

La red que mayor energía cinética es capaz de retener es la malla de alambre MT15000, con un valor medio de 192,5 kJ; un 52,8% más que la red de cables cuadrada, y entre 6 y 8 veces más que las redes triangulares.

Desde el punto de vista del fabricante de pantallas, es importante relacionar la energía que una pantalla es capaz de absorber con otro parámetro relacionado con su coste. Por ello a continuación se propone un parámetro de eficiencia. La eficiencia de cada modelo se calcula como

la máxima capacidad energética de la pantalla dividida por la masa de la malla o red (que se relaciona directamente con el coste). No se trata de un parámetro que proporcione un indicador de la efectividad de una pantalla frente al impacto de un bloque, pues simplemente observando la Figura 92 se observa cual es la red con mayor capacidad de retención, sino una medida que ayuda al fabricante a seleccionar la mejor opción en términos de ahorro de material (y costes) entre las posibilidades estudiadas.

Tabla 23. Eficiencia de las mallas estudiadas en relación con su masa.

| | Masa (kg/m ²) | Masa total red (kg) | Energía media (kJ) | Energía/masa (kJ/kg) |
|--|------------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|
| MT15000 | 5,50 | 495 | 190,3 | 0,384 |
| Red cuadrada | 3,80 | 342 | 126,0 | 0,368 |
| Red cuadrada + malla triple torsión | 5,15 | 463,5 | 126,0 | 0,272 |
| Red triangular O1 | 2,64 | 237,6 | 28,7 | 0,121 |
| Red triangular O2 | 2,64 | 237,6 | 23,5 | 0,099 |

Los resultados muestran que la malla MT15000, además de ser la que mayor energía de impacto absorbe en términos absolutos, también es la mejor opción si se atiende a su eficiencia en relación a su masa, siendo capaz de absorber 0,384 kJ/kg frente a los 0,368 kJ/kg de la red cuadrada (que se está tomando como referencia en este trabajo). Habría que destacar que esta diferencia podría ser incluso más pronunciada si se tiene en cuenta que mientras que la malla MT15000 tiene una retícula suficientemente pequeña para no dejar pasar pequeñas piedras, la red cuadrada debe de ser reforzada con una malla de triple torsión que no aporta un suplemento de resistencia, pero sí que ayuda a evitar que rocas de pequeño tamaño lleguen al lugar a proteger. Esta malla de triple torsión aporta una masa extra de 1,35 kg/m², por lo que reduciría la eficiencia hasta 0,272 kJ/kg, un 30% menos que la malla MT15000. Por todo esto, la malla MT15000 ha sido la seleccionada para su inclusión en el diseño de la pantalla dinámica objeto de estudio de este trabajo.

4 Diseño de un disipador de energía

La creación de un disipador de energía para su utilización en pantallas dinámicas para retención de rocas es un proceso que requiere el seguimiento una serie de pasos: diseño inicial, simulación numérica, ensayos experimentales y optimización de la geometría.

4.1 Criterios de diseño

En el proceso de diseño de un freno es necesario tener en cuenta 4 aspectos esenciales:

- Integridad

Los frenos deben diseñarse con una resistencia y/o geometría tal que en el momento en el que se agote su posible desplazamiento no se produzca su rotura; es decir, que no se divida en 2 partes. Esto causaría la desconexión de los cables laterales, perimetrales o superiores a los puntos de anclaje y llevaría a la pantalla a la inestabilidad, anulando la eficacia del sistema de retención. En algunos casos la continuidad se garantiza incorporando el mismo cable de conexión dentro del propio sistema de freno, tal y como ocurre con los frenos en anillo de Geobrugg. Otro método para asegurar la integridad es el diseño de dispositivos entrelazados, como el freno en doble U empleado por MTC. El último método es la colocación de un cable adicional en paralelo con el freno, para que, en caso de colapso de este, el cable sea capaz de evitar la separación de los cables de

conexión. En el caso de frenos actuando por fricción, el uso de topes al final de los cables evita una excesiva elongación del cable y actúa como limitador de desplazamiento.

- Adaptabilidad

Los frenos deben ser preferiblemente versátiles en cuanto a materiales empleados, regulación de la fricción, dimensiones, etc. La variación de estos parámetros puede generar numerosas opciones en cuanto a capacidad de absorción. En el caso de los frenos por fricción, existen 2 componentes de la fricción que pueden ser moduladas para adaptar el freno a las necesidades específicas: el coeficiente de fricción μ y la fuerza normal N . El coeficiente de fricción depende de los dos materiales en contacto, así como de la temperatura, rugosidad de las superficies y velocidad relativa entre las superficies. La fuerza normal se puede hacer variar cambiando la presión entre las piezas del freno. Las propiedades mecánicas del material también afectan a la energía, proporcionando una amplia adaptabilidad a los frenos que trabajan por deformación, que depende fundamentalmente del límite elástico y la carga de rotura. La variación de las dimensiones, por ejemplo, del espesor de los tubos de Maccaferri, aumenta la fuerza a ejercer para poder comprimirlos.

- Durabilidad

Debido a que en la mayoría de los casos los frenos van a sufrir las inclemencias climáticas, es de gran importancia tener en consideración la resistencia a la humedad, a la corrosión y a la temperatura. Una solución para evitar la corrosión es la utilización de aceros inoxidables o materiales con capas protectoras antioxidantes. En relación a la humedad, no existe aún ningún estudio que determine la variabilidad del comportamiento de los frenos bajo condiciones de lluvia. Se puede asumir que cuando las superficies de un freno se encuentran húmedas o mojadas, el coeficiente de rozamiento se reduce (el agua actúa como lubricante).

- Estado límite de servicio

Va a depender del número de impactos de diferente energía. Cuando ocurre un impacto sobre una pantalla, los frenos que en ella se encuentran pueden funcionar totalmente (hasta el límite de su desplazamiento), parcialmente, o incluso si el impacto no es de gran energía no llegar a comenzar a trabajar. Actualmente, los frenos están diseñados para tener una vida corta en relación al resto de componentes de la pantalla, ya que están diseñados para ser el elemento más débil de la estructura. Por ello suelen estar conectados de tal manera que puedan ser fácilmente reemplazados.

4.2 Nuevo diseño estudiado

Analizados y estudiados los mecanismos existentes hasta la fecha, se decide enfocar el diseño en un nuevo sistema de disipación de energía basado en la absorción de energía por plastificación de sus componentes. Lo conforman una serie de perfiles huecos dispuestos uno tras otro. Cada uno dispone de cuatro orificios por donde los cables que los une a la pantalla los atraviesa. Los tubos alineados se encuentran encerrados entre 2 piezas metálicas (a las que llamaremos topes) de mayor espesor que los anteriores. Los cables se introducen por los orificios desde extremos opuestos y en direcciones contrarias. A los extremos libres de los mismos que llegan cada uno de los topes de lados opuestos se les colocan uno o varios casquillos de aluminio consecutivos, a los que se les aplica presión quedando estos fijados al cable sin posibilidad de deslizamiento.

La caída de un bloque sobre la pantalla provoca la compresión de los topes sobre los perfiles provocando el aplastamiento de los tubos, proceso por el que absorben gran cantidad de la energía generada por el desprendimiento de material sobre la red, salvaguardando, de esta forma, la integridad de la pantalla.

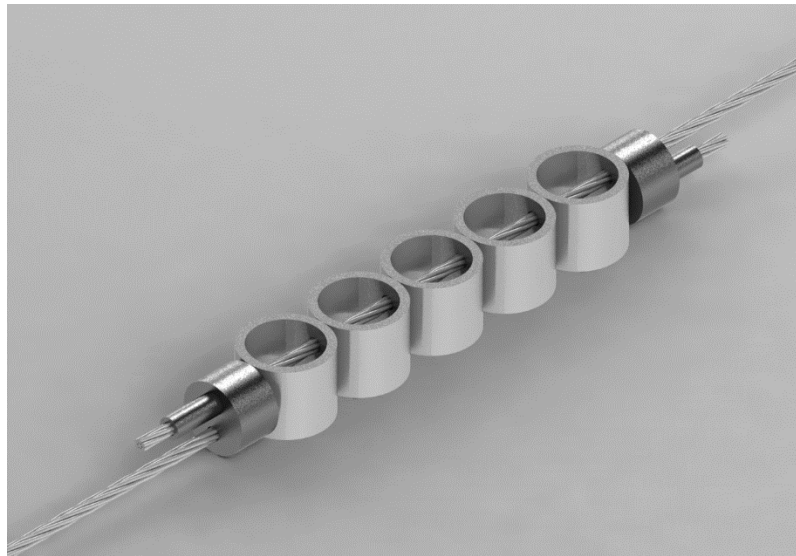


Figura 93. Prototipo de disipador por deformación

A continuación, se explica con detalle cada uno de los componentes:

Perfiles huecos

Son los componentes principales que absorben la energía generada por el impacto sobre la pantalla. Se construyen de acero u otra aleación metálica con alto nivel de deformación. Además, se evitará perfiles soldados prefiriéndose barras perforadas, que no aportan irregularidades en el material.

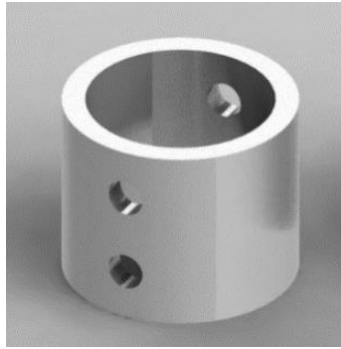


Figura 94. Perfil hueco cilíndrico.

Piezas metálicas extremas: topes

En cada extremo del freno se coloca una pieza metálica o tope con dos orificios de paso de los cables. Estos topes producen el aplastamiento de los perfiles sin sufrir deformación alguna. Estos topes pueden ser circulares o cuadrados.

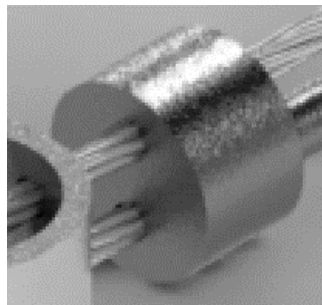


Figura 95. Tope macizo.

Casquillos

Cilindros de aluminio que se fijan por compresión en ambos extremos del cable, una vez que ha atravesado todos los perfiles y los topes, cuya función es transformar la fuerza de tracción proveniente de los cables en presión sobre los topes macizos.

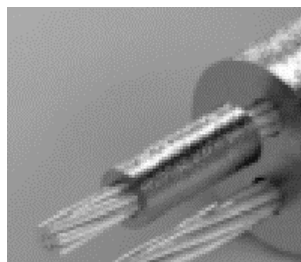


Figura 96. Casquillo de fijación.

Cables

El diseño de los frenos debe asegurar que estos puedan ser reemplazables. Por tanto, cada freno constará de dos cables, que serán independientes de los vientos laterales y superiores de la pantalla. Dichos cables terminarán en sendas gazas, que permitirán una sencilla instalación del freno en el viento correspondiente mediante el empleo de sujetacables.

Cable de seguridad

Se trata de un cable que se fija a ambos extremos del freno mediante gazas, y que permite la completa extensión del freno sin entorpecer su recorrido. En caso de que alguno de los cables principales del freno falle, el cable de seguridad se encarga de asegurar la continuidad del viento en el que se ha instalado y evitar el descuelgue de la pantalla.

4.3 Primeras simulaciones numéricas

La primera acción inmediatamente posterior a la invención del nuevo freno consistió en la simulación numérica por elementos finitos. Para ello se empleó el software ANSYS Workbench. En un inicio se empleó el módulo Static Structural, cuyo uso se centra en la realización de modelos de comportamiento cuasi-estático.

El primer modelo consta de 5 tubos de diámetro exterior 101,6 mm, espesor 5 milímetros y longitud 120 mm. Los topes superior e inferior son dos placas cuadradas de 20 mm x 120 mm y altura 25 mm. Los cables atraviesan los componentes del freno por los orificios que se encuentran alineados y en sentido contrario, y se encuentran unidos físicamente a los topes, eliminando así problemas de convergencia debidos a los contactos y reduciendo el tiempo de cálculo. Además, tanto los topes como los cables se simplifican definiéndolos como sólidos rígidos, lo que facilita la convergencia del modelo. El tope inferior permanece fijo, y se impone un desplazamiento negativo sobre el tope superior que genera la compresión del tubo.

El coeficiente de rozamiento asignado entre el tubo con los topes, con los cables y consigo mismo es de 0,2, pues es valor del coeficiente acero-acero comúnmente encontrado en la literatura.

El acero de los tubos es de calidad ST 52 (S355 JR), que tiene las siguientes características:

$$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$$

$$E = 210000 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0,3$$

$$f_y = 360 \text{ MPa}$$

$$E_t = 1311,2 \text{ MPa}$$

El tamaño de malla es de 1,6 mm, permitiendo así un número mínimo de elementos por espesor de 3 (Figura 97). Además, se permite que la malla se modifique adaptándose en función de la proximidad con otros sólidos y la curvatura de las aristas, lo que mejorará significativamente el comportamiento del modelo.



Figura 97. Geometría y malla del modelo FEM inicial del freno.

El resultado final obtenido se puede observar en la Figura 98. Los tubos se comprimen absorbiendo energía por deformación, adquiriendo una forma de “infinito”. Esto es debido a que la sección central se encuentra debilitada por los orificios por donde deben pasar los cables. Sin embargo, este modelo no es válido ya que se observan zonas donde la tensión supera a la tensión última del material, que podría estar fracturado, y por tanto no contribuiría a la transmisión de tensiones. Las zonas críticas de los tubos (zonas en colores rojizos, en las que las tensiones son mayores) se encuentran en dos planos perpendiculares.

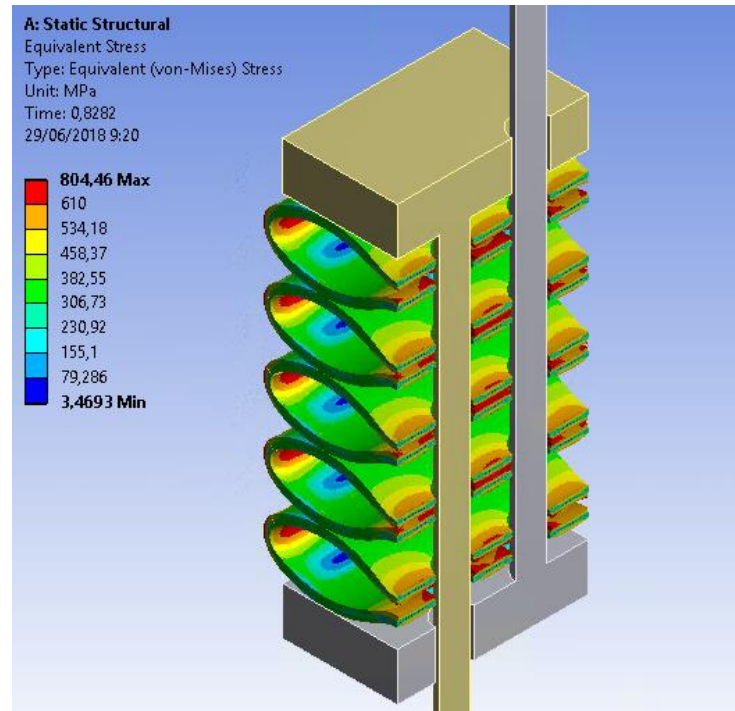


Figura 98. Tensiones equivalentes resultantes de aplicar la compresión sobre los tubos del freno.

Adicionalmente, se aprecia que el aplastamiento de los tubos provoca la deformación de los orificios circulares por los que trascurren los cables. Esto podría provocar el “ahogamiento” o “pinzamiento” del cable, impidiendo que este circule libremente y por tanto incapacitando el funcionamiento del freno.

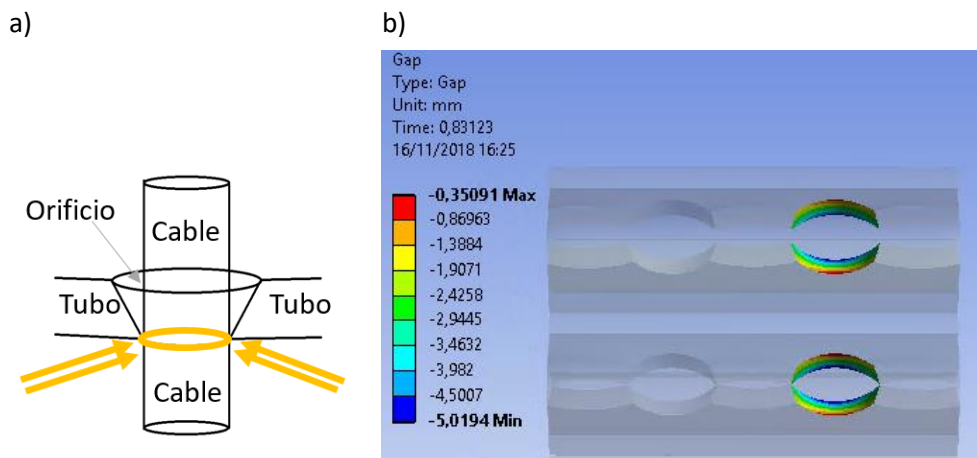


Figura 99. Estrechamiento de los orificios de los tubos que podría provocar el pinzamiento de los cables del freno.

En la Figura 99 se observa que para este caso, con un tubo de espesor 5 mm, la holgura entre cable y orificio es de apenas 0,35 mm. Para tubos de mayores espesores, este comportamiento podría verse agravado hasta el punto de impedir completamente el funcionamiento del freno. Por eso en los siguientes modelos se rasgarán los orificios, ya que de esta manera el freno apenas pierde resistencia a compresión pero se evita completamente el pinzamiento de los cables

Debido al alta no linealidad presente en el modelo, dada por la plasticidad y posible rotura del material, se decide pasar al módulo Explicit Dynamics de Ansys Workbench. En este módulo se decide reducir el número de tubos de la simulación, ya que el coste computacional es directamente dependiente del tamaño de los elementos. A los nuevos modelos se les introduce un modelo de rotura en el material de los tubos y se incluye la opción de desactivación de los elementos cuando superen la tensión de rotura. En la Figura 100 se observa el comportamiento de una de las simulaciones iniciales tras superar el límite de rotura de los tubos.

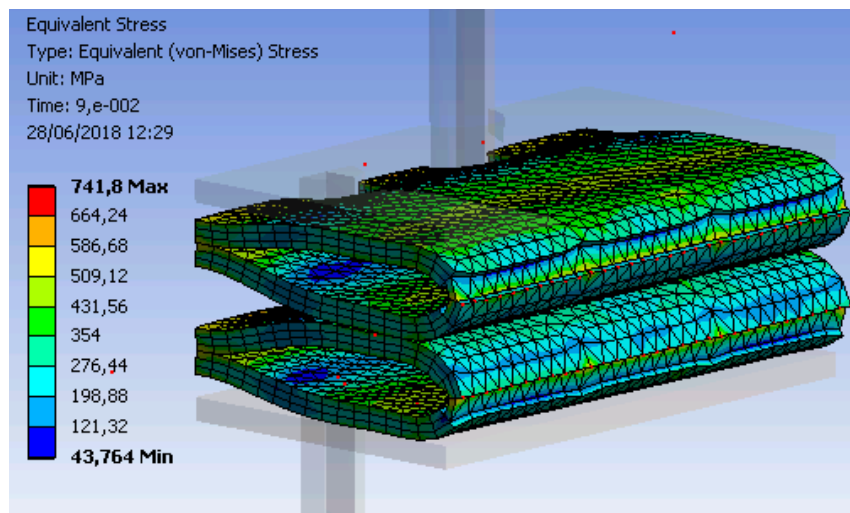


Figura 100. Simulación de un freno de dos tubos, donde se observa la desaparición de algunos elementos, que ya han llegado a su límite de rotura.

4.4 Programa de ensayos

Para comprobar que el nuevo diseño de freno tiene un comportamiento adecuado y acorde a las simulaciones numéricas iniciales se realizan ensayos tanto estáticos como dinámicos.

4.4.1 Ensayos dinámicos

En primer lugar, se comienza con la realización de ensayos dinámicos, puesto que son los que presentan una mayor similitud en la aplicación de la carga (de impacto) respecto a la realidad. Se decide que estos ensayos se harán según la manera de proceder del ensayo dinámico tipo II (Figura 24), ya que el ensayo dinámico tipo III requiere una infraestructura más compleja y costosa.

Los autores encontrados que realizan ensayos de tipo II (Trad et al., 2011) lo hicieron a cielo abierto, en una pared vertical de 80 metros, con lo que la energía aportada al freno podía llegar a 600 kJ empleando una masa de 3 toneladas y una altura de caída de 20m. En este caso, ya que se trata de una fase inicial de desarrollo, no se requieren energías tan altas. El estudio se realizará sobre frenos a escala y para ello se dispone de un pórtico de 4,9 m de altura situado en el Departamento de Estructuras de la Escuela de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.



Figura 101. Pórtico disponible para la realización de ensayos dinámicos.

4.4.1.1 Esquema de ensayo

El esquema del ensayo se puede observar en la Figura 102. Sobre la viga horizontal del pórtico se coloca una eslinga de acero que se une con un grillete de alta resistencia. Este elemento tiene como objetivo servir de punto fijo en altura para la fijación de uno de los extremos del freno. Del otro extremo del freno se coloca una masa, formada por piezas de acero soldadas (para evitar que puedan salir despedidas), que suman un total de 465 kg, y un bulón que atraviesa de abajo a arriba el conjunto y se fija al cable mediante otro grillete de alta resistencia.

Para la elevación del bloque se emplea el puente grúa. El dispositivo empleado para dejar caer el peso es un gancho con dos orificios, el superior para la unión con la eslinga que va al puente grúa y el inferior con el grillete que va al peso y al freno. El gancho dispone de una palanca que, activada con seguridad mediante el uso de una cuerda de larga extensión, permite la apertura del orificio inferior y la liberación del peso. Ya que la palanca está en posición invertida a la posición de tiro, se emplea una pequeña polea para guiar la cuerda. El gancho posee un dispositivo de bloqueo para evitar que se produzcan accidentes al abrirse en situaciones no deseadas.

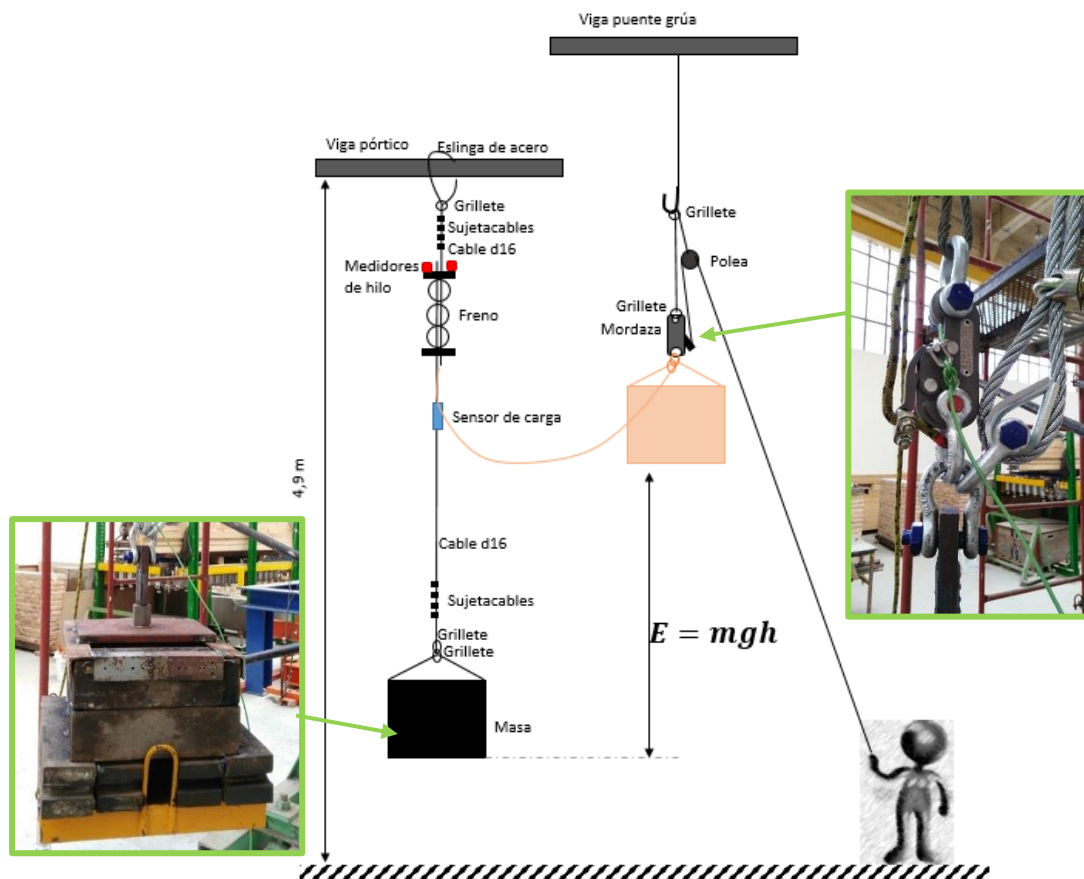


Figura 102. Esquema de ensayo del ensayo dinámico. Detalles del gancho de liberación y del bloque fabricado con piezas metálicas

4.4.1.2 Instrumentación

Para conocer la carga soportada por el cable y, por lo tanto, la fuerza de compresión en el freno en cada instante de tiempo, se emplea un medidor de fuerza (Figura 103a). La frecuencia de rastreo es de 5000 datos por segundo.

Para la obtención de la medida de la compresión del freno se utilizan dos medidores de hilo (Figura 8b) que se colocan en la pieza cuadrada superior, uno en cada lado, conectando los hilos con la pieza cuadrada inferior. La compresión en la zona central será la media de la medida de los dos sensores en cada instante de tiempo.

Por último, se conecta una cámara web con el fin de poder revisar el comportamiento de los frenos conjuntamente con los datos de los sensores.

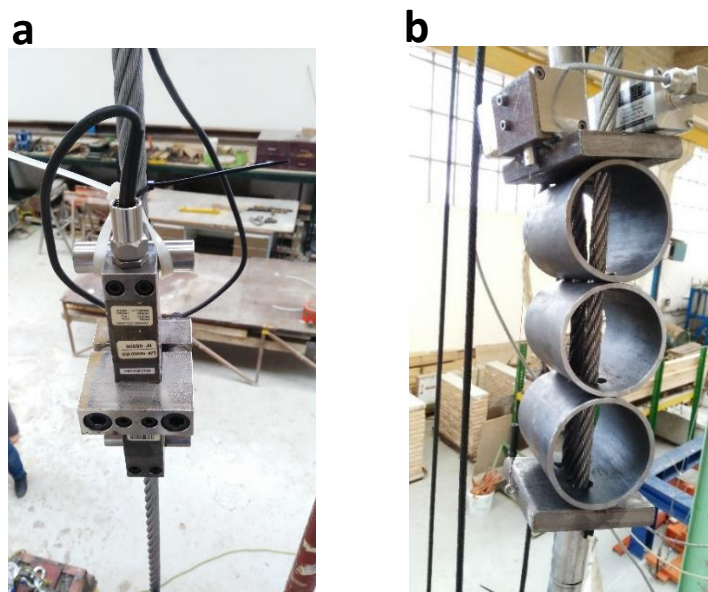


Figura 103. Sensores de medida: a) medidor de fuerza en el cable, y b) medidores de hilo, sujetos en la parte superior del freno y con el hilo extendido conectado a la placa inferior.

El equipo de adquisición de datos empleado en estos ensayos ha sido el DEWE 43 A, facilitado por Inchalam S.A. (Figura 104).



Figura 104. Equipo de adquisición de datos Dewe 43

4.4.1.3 Geometría de los frenos ensayados

Se decide ensayar cuatro tipos de frenos en los que se varía el número de tubos y sus dimensiones (Tabla 24). Pese a que el número de tubos en el freno final se prevé mayor, se ensayan frenos a escala debido a las limitaciones de altura y peso de la masa de acero.

Tabla 24. Características de los frenos que se someterán a ensayo dinámico.

| | <i>Nº tubos</i> | <i>D_{ext} (mm)</i> | <i>Espesor(mm)</i> | <i>Longitud (mm)</i> |
|--------------|-----------------|-----------------------------|--------------------|----------------------|
| Freno Tipo 1 | 2 | 101,6 | 5,0 | 120 |
| Freno Tipo 2 | 2 | 114,3 | 6,3 | 120 |
| Freno Tipo 3 | 3 | 101,6 | 5,0 | 120 |
| Freno Tipo 4 | 3 | 114,3 | 6,3 | 120 |

La energía aplicada en el impacto se selecciona a partir de simulaciones numéricas iniciales a los frenos anteriormente especificados. En los ensayos dinámicos se prefiere que los tubos no sufran ninguna ruptura. Las roturas podrían causar desprendimientos de partes de los tubos, o astillas metálicas que se dispararían de forma incontrolada. Por ello se seleccionan niveles de energía previos a la situación de rotura del material. En apartados posteriores se realizarán ensayos cuasiestáticos, donde los tubos independientes y los frenos se ensayarán de forma controlada para obtener sus curvas de comportamiento. Estos ensayos dinámicos tratan de determinar si estos dispositivos funcionan correctamente en condiciones de aplicación de la fuerza reales. Las deformaciones obtenidas para el nivel de energía previo a la rotura se muestran en la Figura 105.

Aunque las simulaciones ofrecen una determinada energía que se asocia a la deformación de los tubos perforados, se sabe a ciencia cierta que los cables también absorberán cierta energía por deformación elástica, que el sistema recuperará en el rebote. Aunque se podría plantear la posibilidad de aumentar la energía del impacto debido a este factor, se cree conveniente utilizar la energía de la simulación, a modo de coeficiente de seguridad. La realización de estas simulaciones y ensayos fue previo a la realización de los ensayos de tracción en los cables, por lo que en la planificación de los ensayos dinámicos aún no se disponía de esa información experimental. Por ello no se conoce la cantidad exacta de energía elástica absorbida por el cable, aunque se sabe que es claramente dependiente de su longitud. Si se aumentase la energía aplicada en exceso podría producirse la rotura del cable, lo que haría que la masa se desplomase, o que la estructura sufriese más de lo permitido.

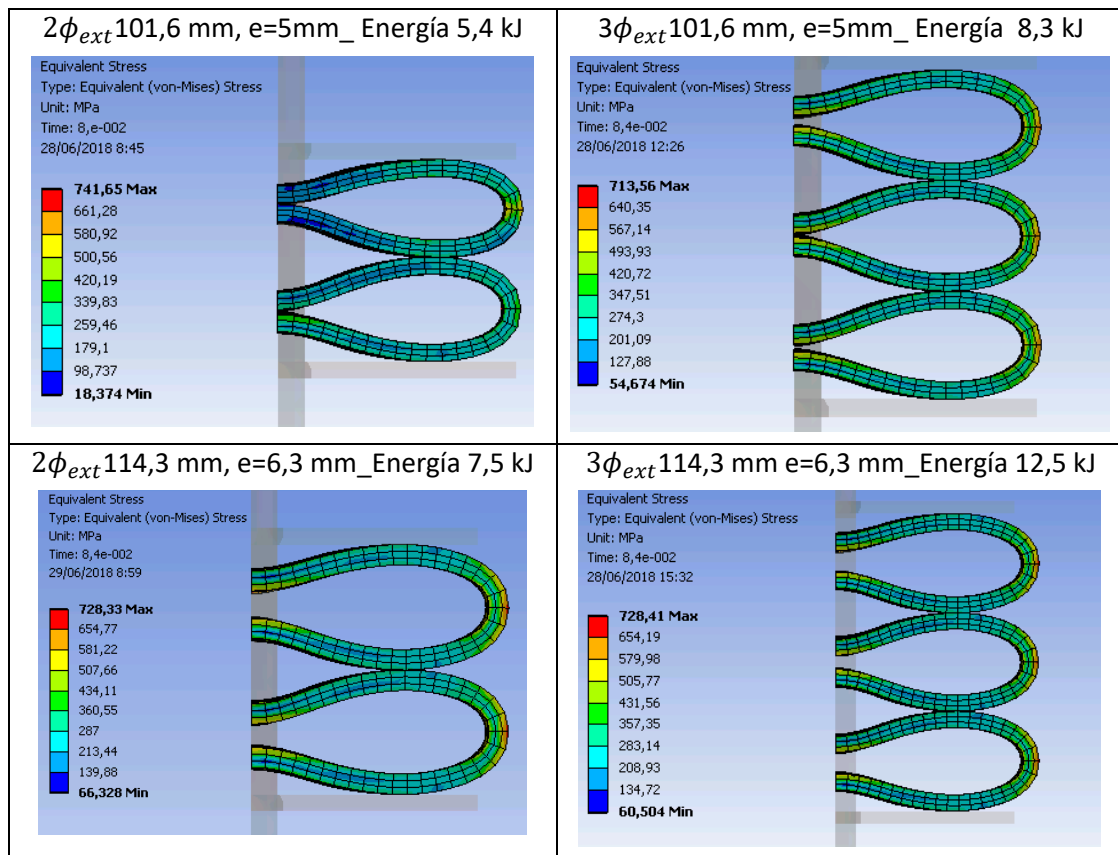


Figura 105. Tensiones de Von Misses y estado de compresión de los tubos para la energía que se aplicará en los ensayos dinámicos.

Las energías, junto con las alturas de la masa y velocidad en el instante del impacto se detallan en la Tabla 25, en la que la velocidad de impacto se calcula empleando la fórmula $v = \sqrt{2gh}$, y el incremento de altura corresponde la distancia a la que hay elevar la masa colgada respecto de su posición de reposo para que en el instante de impacto tenga la velocidad deseada.

Tabla 25. Energía aplicada a cada uno de los frenos ensayados.

| | Nº ensayo | Energía (kJ) | Incremento h (m) | V impacto (m/s) |
|---------|-----------|--------------|------------------|-----------------|
| FRENO 1 | 1,2,3 | 5,4 | 1,18 | 4,8 |
| FRENO 2 | 4,5,6 | 7,5 | 1,62 | 5,6 |
| FRENO 3 | 7,8,9 | 8,3 | 1,78 | 5,9 |
| FRENO 4 | 10,11,12 | 12,5 | 2,71 | 7,28 |

4.4.1.4 Resultados

Tal y como se esperaba, los tubos de los frenos no se deformaron totalmente. En la Tabla 26 se muestra el porcentaje de energía absorbida por los tubos del freno respecto a la energía total aplicada. La energía absorbida se calcula mediante la integración de la curva carga-desplazamiento dada por los registros de las células de carga y los medidores de hilo (Anexo 1).

Tabla 26. Datos de energía aplicada al ensayo, energía absorbida por los frenos en cada uno de los ensayos (calculada como el área bajo la curva carga-desplazamiento), y proporción de energía absorbida por el freno respecto de la total aplicada.

| | Nº ensayo | Energía aplicada al ensayo (kJ) | Energía absorbida por el freno (kJ) | E_{abs}/E_{apli} |
|---------|-----------|---------------------------------|-------------------------------------|--------------------|
| FRENO 1 | 1 | 5,4 | - | - |
| | 2 | 5,4 | 1,990 | 0,368 |
| | 3 | 5,4 | 2,368 | 0,430 |
| FRENO 2 | 4 | 7,5 | 2,535 | 0,330 |
| | 5 | 7,5 | 1,937 | 0,258 |
| | 6 | 7,5 | 2,943 | 0,392 |
| FRENO 3 | 7 | 8,3 | 5,618 | 0,676 |
| | 8 | 8,3 | 4,743 | 0,571 |
| | 9 | 8,3 | 4,422 | 0,532 |
| FRENO 4 | 10 | 12,5 | 6,042 | 0,483 |
| | 11 | 12,5 | 5,816 | 0,465 |
| | 12 | 12,5 | 7,102 | 0,568 |

Del total de energía aplicada al ensayo, la deformación plástica de los tubos solo supone entre un 25 y un 67%. El resto de energía corresponde a la energía por deformación elástica de los cables, las fricciones en el acomodamiento de los cables entre sí y con los sujetacables, y la fricción de los cables con las placas cuadradas superior e inferior debida a la excentricidad del dispositivo.

La fuerza de activación de los disipadores es de aproximadamente 25 kN para el tipo 1, y de alrededor de 45 kN en el tipo 2. En los frenos tipo 3 y 4 las fuerzas de activación que se obtienen son mas dispares, siendo de entre 19 y 38 kN en el tipo 3 y de entre 45 y 55 kN en los de tipo 4. En la Figura 106 se muestra el estado final de los disipadores después del ensayo.

FRENO TIPO 1. Ensayo 2



FRENO TIPO 2. Ensayo 4



FRENO TIPO 3. Ensayo 7



FRENO TIPO 4. Ensayo 10



Figura 106. Estado final de los 4 tipos de disipadores ensayados dinámicamente.

4.4.2 Ensayos estáticos

La ejecución de ensayos dinámicos mostró la existencia de multitud de variables que son difíciles de controlar: el rozamiento de la eslinga con la viga horizontal que actúa como punto fijo en altura del ensayo, el rebote del peso después del primer impacto, que se traduce en una recuperación de energía impredecible, el rozamiento de los cables con las chapas superior e inferior del freno, etc.

Con el objetivo de eliminar todas estas incertidumbres se decide realizar ensayos estáticos de tracción sobre un prototipo de freno de 2 tubos de diámetro exterior 101,6 mm y espesor 5 mm (freno tipo 1 atendiendo a la nomenclatura del informe de ensayos dinámicos), así como ensayos estáticos de tracción al cable de diámetro 16, y ensayos de compresión de los tubos empleados en el freno, de diámetro exterior 101,6 mm y espesor 5 mm.

Los ensayos de tracción de los cables de acero y de los frenos se realizaron en el Laboratorio De La División de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales (LADICIM) y los ensayos de compresión de los tubos en el Laboratorio de Geosintéticos de la Universidad de Cantabria (LAGUC).

4.4.2.1 Ensayos a los cables del freno

Los cables de acero ensayados fueron suministrados por la empresa Malla Talud Cantabria. Se ensayaron un total de 6 muestras, de diámetro de 16 mm y longitud 680 mm, a una velocidad de 0,1 mm/s.

En la Figura 107 se pueden observar las muestras después del ensayo. En todos los casos se produjo la rotura de uno o varios torones, excepto en el caso 3, en donde el cable se rompió completamente.



Figura 107. Muestras de los cables ensayados estáticamente en las instalaciones de LADICIM

Los cables ensayados muestran 2 comportamientos diferentes. Las muestras 1, 2 y 3 presentan un mayor módulo elástico y menor carga de rotura que las muestras 4, 5 y 6. Además, estos últimos presentan una curva carga-desplazamiento similar (curvas superpuestas en el gráfico), mientras en los cables 1, 2 y 3 existe una mayor variabilidad posterior al límite elástico.

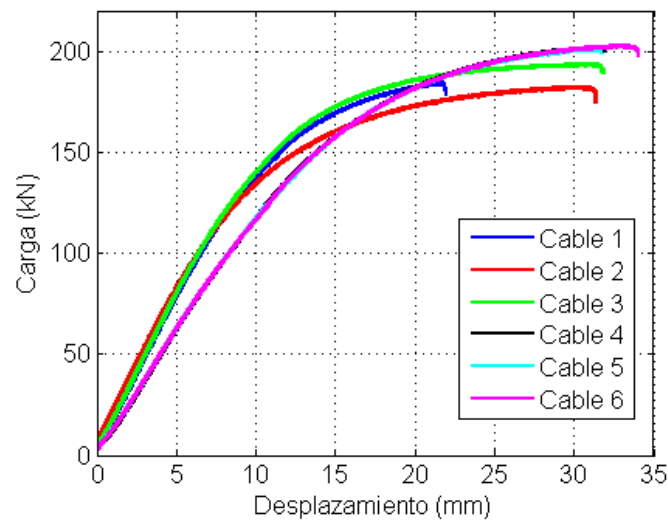


Figura 108. Gráficas Fuerza-Desplazamiento de las seis muestras de cable ensayadas

Se cree que Malla Talud nos suministró 2 modelos de cable distintos, a la vista del aspecto exterior y observación del número de alambres por torón. Aun teniendo en cuenta esto, en la mayoría de los casos las energías absorbidas por ambos modelos son similares (Tabla 27). El único valor atípico de energía se produce en el cable 1, donde se produce una rotura temprana, posiblemente debida al que alguno de sus alambres estaba deteriorado.

Tabla 27. Tabla resumen de la información característica de los cables ensayados: carga de rotura (F_u) y energía absorbida.

| Cable | F_u (kN) | Energía (kJ) |
|-------|------------|--------------|
| 1 | 184,12 | 2,76 |
| 2 | 182,44 | 4,40 |
| 3 | 193,49 | 4,72 |
| 4 | 201,78 | 4,47 |
| 5 | 201,11 | 4,43 |
| 6 | 202,85 | 4,92 |

4.4.2.2 Ensayos estáticos a los tubos

Para la correcta ejecución de estos ensayos a los tubos ha sido necesario adaptar la máquina y los útiles. Se diseñó una plataforma metálica para poder realizar la compresión de los tubos entre dos superficies planas sin que las orejetas exteriores de cada útil existente chocasen entre sí. Además,

para prevenir accidentes relacionados con un posible deslizamiento del tubo en los instantes iniciales, la zona de ensayo se rodeó de una malla plástica. La velocidad de los ensayos fue de 1mm/s.

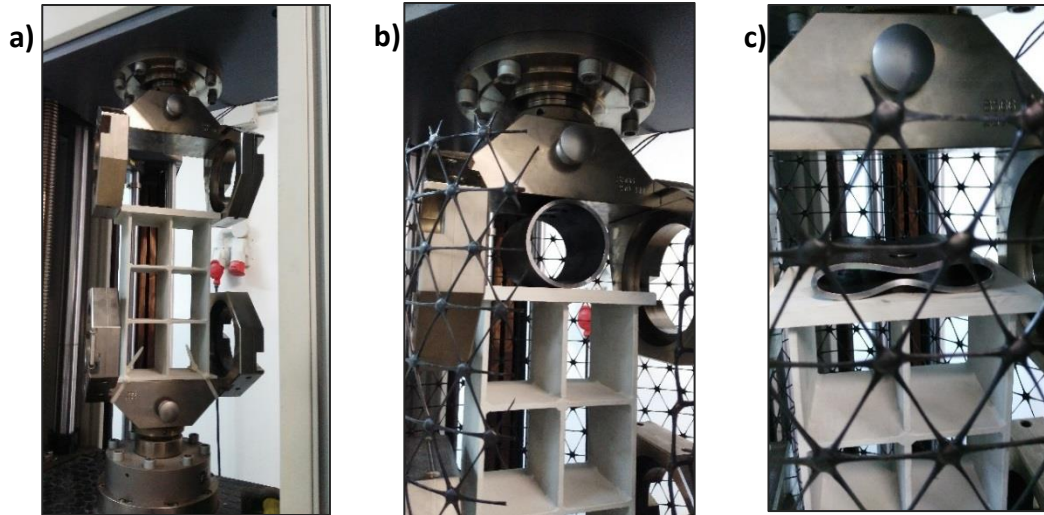


Figura 109. Etapas del ensayo estático: a) Disposición de los utillajes y dispositivos adicionales en la máquina, b) colocación del tubo para su ensayo y de la rejilla plástica de seguridad, y c) deformación del tubo en la máquina en los instantes posteriores al ensayo.

Los ensayos se realizaron a 3 tubos de diámetro exterior 101,6 mm y espesor 5 mm (que llamaremos Tipo 1), y a un tubo de diámetro exterior 114,3 mm y espesor 6,3 mm (Tipo 2). Uno de los tubos de menor diámetro y el tubo de mayor diámetro se mecanizó a partir del material sobrante de los ensayos dinámicos. Los dos tubos restantes de menor diámetro se mecanizaron del material sobrante de los ensayos estáticos del freno.

Las gráficas resultantes se muestran en la Figura 110.

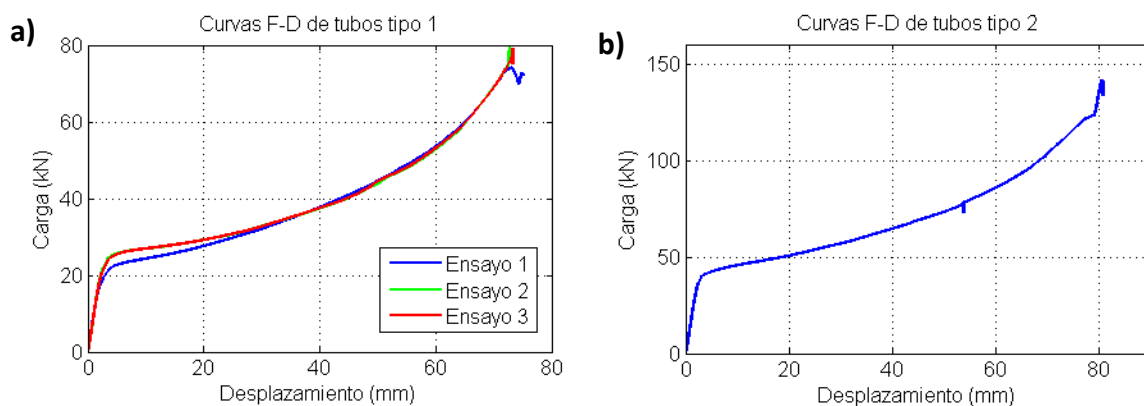


Figura 110. Gráficas Fuerza-Desplazamiento de los ensayos estáticos sobre los tubos: a) sobre muestras de diámetro exterior 101,6 mm y espesor 5mm, y b) sobre una muestra de diámetro exterior 114,3 mm y espesor 6,3 mm.

La energía absorbida por los tubos de menor diámetro es de media 2,7 kJ, con una fuerza de activación de 26 kN. El único ensayo realizado sobre el tubo de diámetro 114,3 mm muestra una fuerza de activación un 53% mayor que las muestras más pequeñas, con un valor aproximado de 40 kJ, así como el doble de absorción de energía, con un valor de 5,65 kJ. Todos estos valores se recogen en la Tabla 28.

Tabla 28. Tabla resumen de la información característica de los tubos ensayados: fuerza de activación y energía absorbida.

| Ensayo | Tipo | $\varnothing_{\text{exterior}}$ (mm) | Espesor (mm) | F activación (kN) | Energía (kJ) |
|--------|------|--------------------------------------|--------------|-------------------|--------------|
| 1 | 1 | 101,6 | 5 | 23 | 2,90 |
| 2 | 1 | 101,6 | 5 | 26 | 2,48 |
| 3 | 1 | 101,6 | 5 | 26 | 2,89 |
| 4 | 2 | 114,3 | 6,3 | 40 | 5,65 |

Al finalizar el ensayo del tubo de 114,3 mm de diámetro se observa la aparición de un gran número de grietas en ambos laterales (Figura 111 izda). Este suceso también se produce en los tubos de 101,6 mm de diámetro, aunque en menor medida (Figura 111 dcha).



Figura 111. Agrietamiento lateral de los tubos en los ensayos de compresión.

Sin embargo, la aparición de estas grietas no provoca un descenso de la carga prematura, sino que lo que provoca la parada del ensayo es la subida repentina de la carga que en el instante de contacto de las caras interiores superior e inferior del tubo. La aparición o no aparición de grietas en los tubos será un factor a tener en cuenta para la modelización posterior. Los ensayos estáticos

a los frenos son los que determinarán la presencia o no de agrietamiento en los tubos o si la energía que podría provocar dicho agrietamiento es absorbida por los cables en lugar de los tubos.

4.4.2.3 Ensayos estáticos a los frenos

La máquina de tracción tomó registros de carga y de desplazamiento. Para medir la compresión de los tubos el ensayo se instrumentó con dos medidores de hilo atornillados a ambos lados de la chapa cuadrada superior, con los hilos fijados a la chapa cuadrada superior. La compresión de los tubos en la parte central corresponde a la media de los dos valores de desplazamiento registrados por los medidores de hilo. Además, se incorporó un sensor de fuerza para cables, con el fin de comprobar y afinar su calibración. La configuración del ensayo se puede ver con detalle en la Figura 112b. La velocidad del ensayo se estableció en 2 mm/s, valor recomendado por la ETAG 027 para el ensayo estático de disipadores de energía. La suma de las longitudes de los cables es de 1100 mm (Figura 112a).

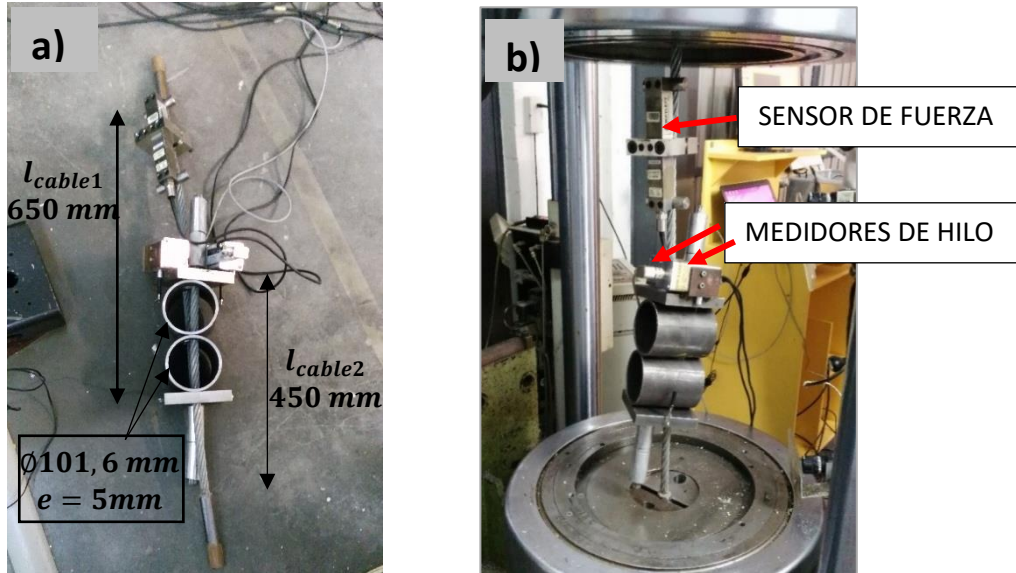


Figura 112. a) Dimensiones del freno, y b) instrumentación y disposición del freno en la máquina de ensayos.

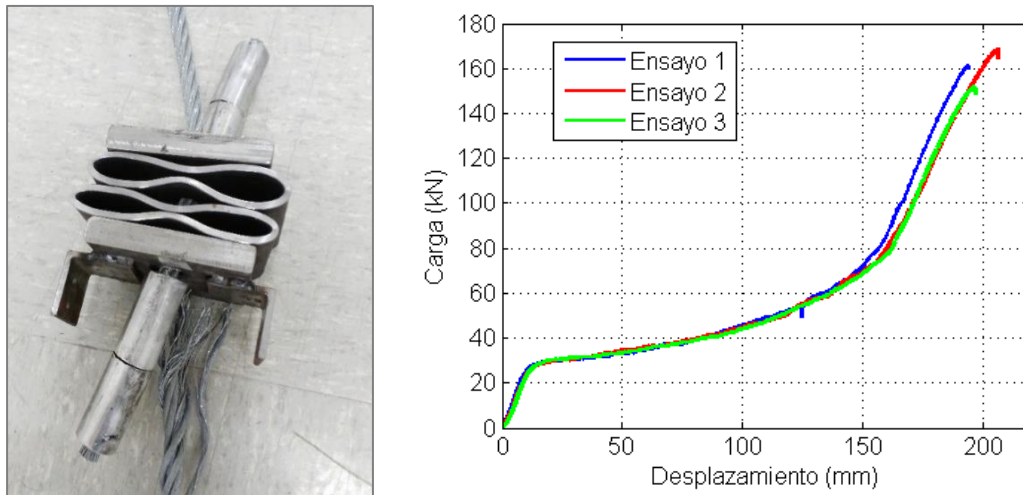


Figura 113. A) Estado del freno posterior a la ejecución del ensayo estático. B) Gráficas Fuerza-Desplazamiento de los 3 frenos ensayados.

Los tres frenos presentaron comportamientos similares en la primera parte del ensayo. La pendiente de la rama más rígida en la última parte del ensayo difiere entre el ensayo 1 y los ensayos 2 y 3. Esto es debido a que los cables tienen propiedades ligeramente diferentes, como se corroboró en los ensayos de cable del 4.4.2.1. Un resumen de los resultados se recoge en la Tabla 29.

Tabla 29. Tabla resumen de la información característica de los frenos ensayados: carga de activación, carga de rotura y energía absorbida.

| Freno | F activación (kN) | Fu (kN) | Energía (kJ) |
|-------|-------------------|---------|--------------|
| 1 | 28 | 162 | 11,24 |
| 2 | 28 | 170 | 12,64 |
| 3 | 28 | 151 | 11,02 |

El registro de la compresión de los tubos a través de los medidores de hilo permite también observar que durante el funcionamiento de los frenos existe un punto de inflexión en el que los tubos dejan de comprimirse. A partir de ese instante la extensión del freno se produce predominantemente por la deformación de los cables hasta que se produce la rotura de uno de ellos en la zona de contacto con las placas metálicas. Esto se puede corroborar con las gráficas de la Figura 114. La curva azul describe la fuerza versus desplazamiento de la máquina, mientras que

la curva roja corresponde al registro de la fuerza versus desplazamiento obtenido mediante los medidores de hilo, que únicamente representan la compresión de los tubos.

Así, al llegar a 130 mm de compresión, la carga aumenta y sin embargo el desplazamiento es muy pequeño. Esto es debido a que en esos momentos la deformación predominante es la del cable y no la de los tubos, ya que los tubos necesitan una carga mucho mayor para seguir deformándose. Por ello el área bajo la curva roja no es totalmente la energía de absorción de los tubos.

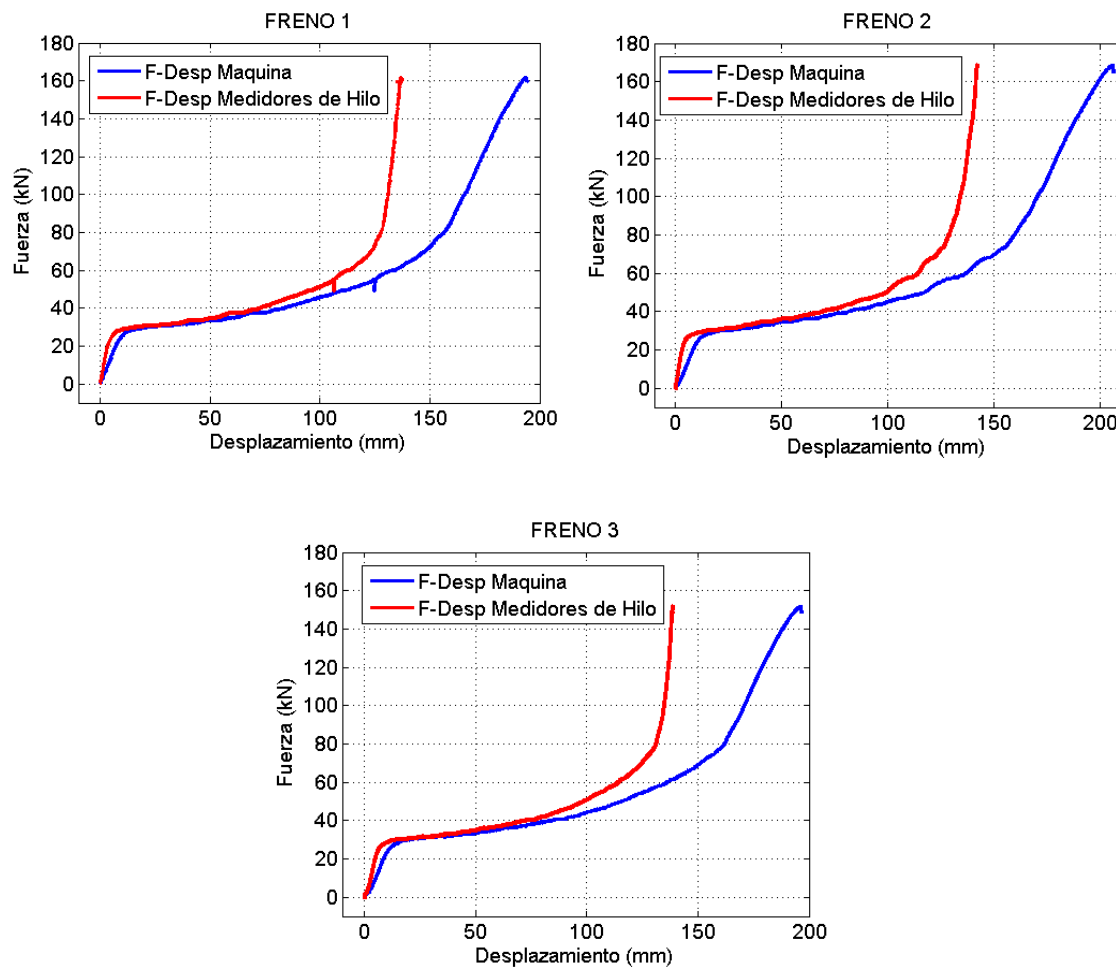


Figura 114. Gráfica Fuerza-Desplazamiento de los frenos 1,2 y 3.

4.4.2.4 Análisis de la energía absorbida por el freno

Tal y como se detalla en los apartados anteriores, los frenos ensayados estáticamente están formados por 2 tubos de 101,6 mm de diámetro y 5 mm de espesor. La suma de las longitudes de los cables en los que va insertado el freno es de 1100 mm. La energía total capaz de absorber el

freno se puede dividir en 3 componentes: la primera es la energía absorbida por la deformación plástica de los tubos, la segunda es la energía por deformación plástica de los cables y, por último, la energía disipada por el rozamiento de los cables contra los orificios de las placas superior e inferior, que también provoca una deformación permanente además de la generación de calor.

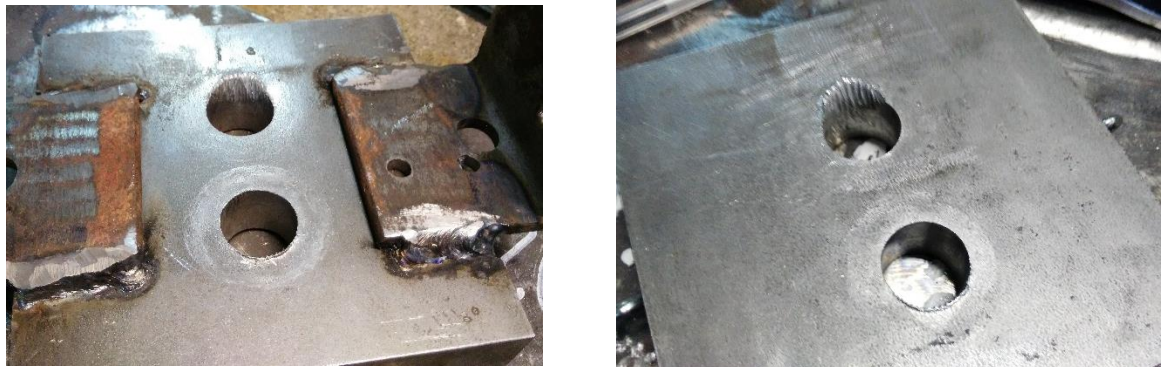


Figura 115. Chapas superior e inferior en las que se muestra la deformación plástica producida alrededor del orificio debido al rozamiento de los cables.

Los frenos ensayados absorben en total una media de 11,63 kJ, valor obtenido de integrar las gráficas resultantes de fuerza frente a desplazamiento de la máquina.

La compresión media de los tubos del freno es de 139,06 mm, que dividido entre 2 tubos corresponde a un desplazamiento por compresión de 69,53 mm para cada uno. La absorción de energía correspondiente a cada tubo hasta un desplazamiento de 69,53 mm es de 2,61 kJ.

En cuanto a los cables, el primer paso para obtener la energía absorbida es obtener la curva Fuerza-Deformación. Tomando como curva representativa la correspondiente al ensayo 4 se realizan los cálculos correspondientes empleando la fórmula $\varepsilon = \frac{l_{final} - l_{inicial}}{l_{inicial}} = \frac{\Delta l}{l_{inicial}}$.

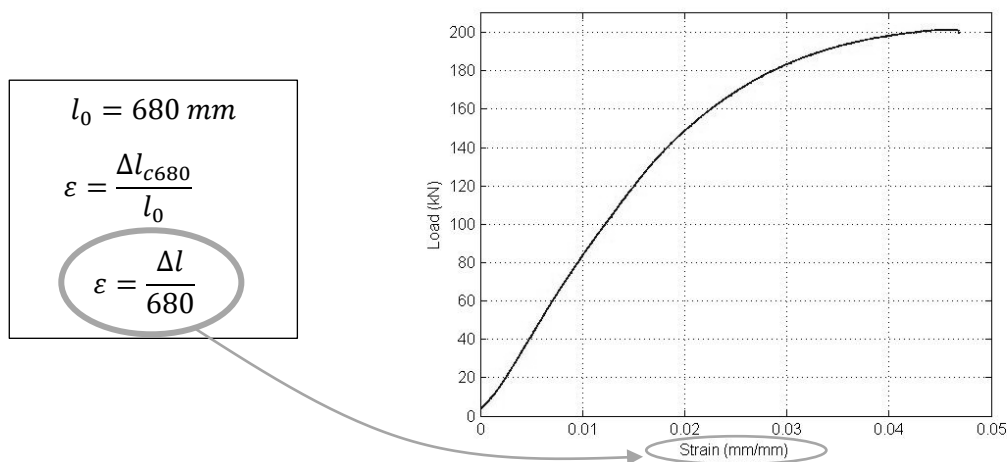


Figura 116. Obtención de la gráfica característica Fuerza-Deformación de un cable de Ø16 mm

Una vez obtenida la deformación del cable, parámetro independiente de la longitud del cable, se recalcula el valor de desplazamiento (eje x), para una longitud inicial de 1100 mm, longitud del cable empleado en los frenos ensayados (Figura 10).

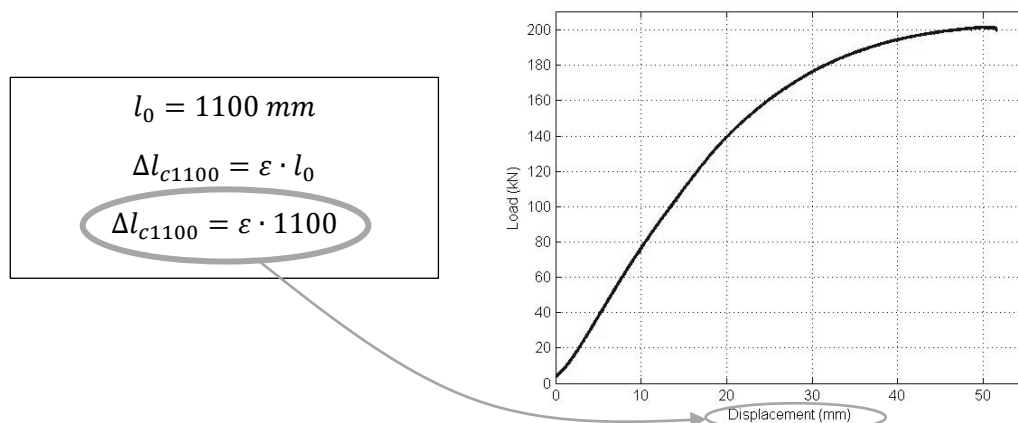


Figura 117. Obtención de la gráfica Fuerza-Desplazamiento de un cable de Ø16 mm para una longitud de cable igual a la empleada en el freno.

Ya que el cable ha sido el elemento crítico del freno, se debe conocer su carga de rotura para calcular la energía que ha sido capaz de absorber. Este valor ha sido bastante variable en los 3 casos: 161,9 kN; 168,9 kN y 152 kN. Tomando la media, de 160,9 kN, se tiene que la energía absorbida por 1100 mm de cable es de 2,24 kJ.

La energía restante; es decir, 11,63-5,22-2,24=4,26 kJ es la correspondiente al rozamiento de los cables con las chapas superior e inferior, que provocan una disipación de energía por liberación de calor y por deformación de las zonas adyacentes a los orificios. En la Tabla 4 se muestran la

magnitud de energía absorbida por cada uno de los componentes, así como la energía total del freno a analizar.

Tabla 30. Tabla resumen de la descomposición de la energía absorbida por el freno en cada uno de sus componentes: deformación de los tubos, deformación de los cables y rozamiento chapas-cables.

| | Energía absorbida (kJ) |
|--------------------------|------------------------|
| Total Freno | 11,63 |
| Deformación 2 tubos | $2 \times 2,61 = 5,22$ |
| Deformación Cables | 2,24 |
| Rozamiento chapas-cables | 3,77 |

Además, en la Figura 118 se representa la evolución de la energía absorbida en función de la elongación del freno completo. En dicha gráfica se comprueba que el principal mecanismo de disipación al inicio es la compresión de los tubos. Cuando la capacidad de compresión de estos se termina, comienza a aparecer disipación debido a la extensión de los cables y del rozamiento de los cables con el resto de elementos del freno, sobre todo con las placas, que provoca incluso cierta deformación, como ya se demostró mediante la Figura 115.

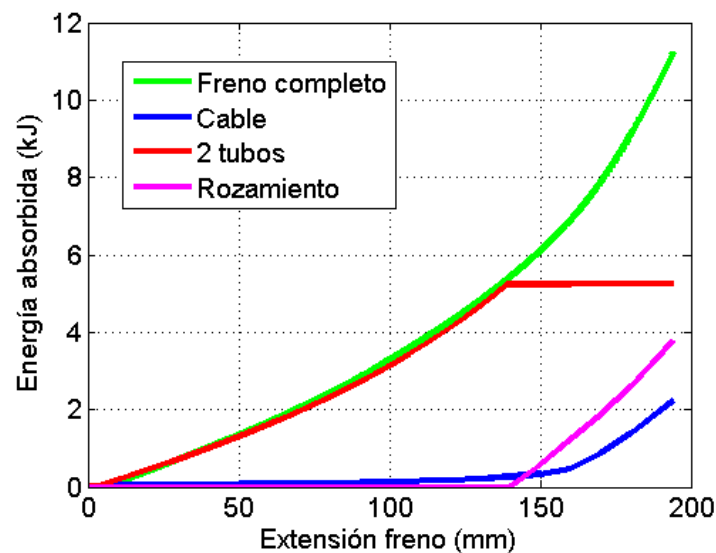


Figura 118. Gráfica Energía versus Extensión del freno, tanto del freno completo como de cada uno de los componentes que aportan disipación de energía: la deformación de los cables, la compresión de los tubos y el rozamiento entre elementos.

4.4.2.5 Análisis comparativo del freno: ensayo estático versus ensayo dinámico

Con el objetivo de analizar las similitudes y diferencias entre los ensayos estáticos y los dinámicos sobre el mismo freno, se deciden comparar sus curvas de comportamiento (Fuerza-Desplazamiento) teniendo solo en cuenta la compresión de los tubos; es decir, tomando como valor de desplazamiento la media de los registros de los dos medidores de hilo empleados en ambos tipos de ensayo (Figura 12).

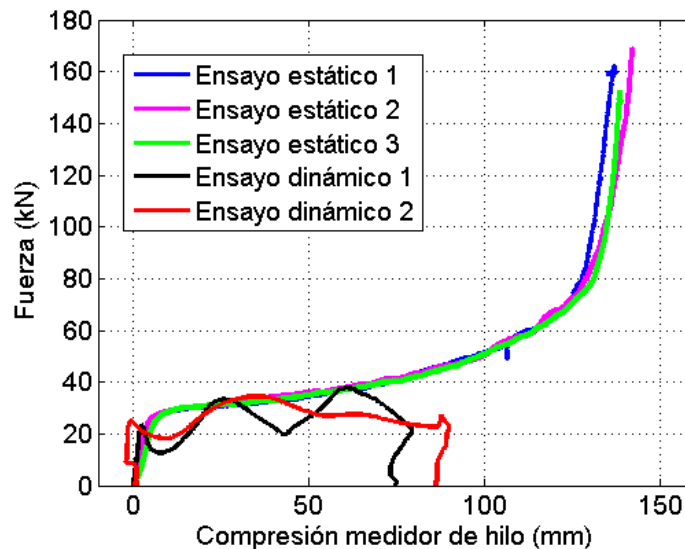


Figura 119. Gráfica Fuerza-Desplazamiento en la que se comparan las curvas obtenidos de los ensayos estáticos y dinámicos para el mismo tipo de freno. La variable desplazamiento representa el registro tomado por los medidores de hilo en ambos casos.

Como se puede observar, la fuerza de activación obtenida de ambos procedimientos es similar. Hay que resaltar que el desplazamiento del ensayo dinámico 2 no se obtuvo, al igual que el resto, con la media del registro de los dos medidores de hilo, ya que uno de ellos resultó dañado durante el ensayo, con lo que se obtuvo con la medición de un solo sensor. Es por ello que la pendiente inicial (pendiente de la zona elástica) del primer ensayo dinámico resulta similar a la de los tres ensayos estáticos, pero no ocurre lo mismo en el segundo.

Las curvas obtenidas de los ensayos estáticos resultan más uniformes que las extraídas dinámicamente. Estas últimas presentan en todos los casos ondulaciones debidas a la forma de aplicación de la carga, que no es constantemente creciente sino que surge de la reacción provocada por la caída de una masa sujeta al cable. Esto provoca impactos, rebotes y recuperación de energía que no se da estáticamente.

Comparando niveles de fuerza en ambos tipos de ensayo, se puede determinar que los ensayos estáticos marcan el nivel máximo de fuerza para cada nivel de desplazamiento. Así, se observa que las gráficas dinámicas se encuentran bajo la curva estática en todos los casos, llegando a lo sumo a alcanzar el mismo nivel de fuerza como ocurre para un desplazamiento de 25 mm y 60 mm del ensayo dinámico 1 y para un desplazamiento de 35 mm en el ensayo dinámico 2.

4.4.2.6 Conclusiones

Conclusión 1.

El ensayo estático de los frenos con tubos de 101,6 mm de diámetro y 5 mm de espesor no muestra un comportamiento óptimo. El freno se activa a una carga baja, de 28 kN. A partir de ese punto los tubos se deforman plásticamente de forma progresiva, hasta que llega un punto de carga de alrededor de 75 kN en el que la pendiente de la curva carga-desplazamiento aumenta más rápidamente, lo que indica que los tubos han llegado prácticamente a su máximo de compresión, y el incremento de longitud del freno se produce mayoritariamente por la deformación del cable hasta la rotura.

Una alternativa que mejoraría el rendimiento del freno consistiría en hacer desaparecer esa zona en la que solo actúa el cable. Aumentando el espesor se obtendría una mayor fuerza de activación y por tanto una mayor área bajo la curva carga-desplazamiento.

La búsqueda de un freno con mayor energía de disipación se realizará numéricamente. En primer lugar, se calibra el modelo correspondiente al freno ensayado experimentalmente. Posteriormente se modificarán parámetros geométricos dentro del rango de dimensiones de las que dispone el proveedor para encontrar aquella solución que ofrezca un mejor comportamiento y absorción de energía.

Conclusión 2.

Los cables ensayados a tracción rompen a 190-200 kN. Sin embargo, se ha visto en los ensayos estáticos de los frenos llevados hasta rotura que la carga última es menor, sobre 160 kN. Esto es debido a que, como el freno es antisimétrico, las placas y los tubos no están perfectamente perpendiculares a los cables durante todo el ensayo, sino que tienden a adoptar un ángulo que provoca el rozamiento de las aristas de los orificios con los cables, rompiendo algún alambre de este antes de lo que lo haría normalmente y causando la rotura prematura del mismo. La zona de rotura del cable aparece cerca de alguna de las placas cuadradas de ambos extremos, zona de rozamiento de la placa con el cable. Así lo demuestran las marcas de mordida de las placas (Figura 120).



Figura 120. Instante de rotura del freno en el ensayo estático. En la imagen inferior derecha se pueden observar las marcas de mordida provocadas por el rozamiento del cable sobre las aristas de los orificios de una de las placas.

Conclusión 3.

Aunque en los ensayos realizados a los tubos independientes se aprecien agrietamientos en ambos laterales de las muestras, esto no ocurre en los ensayos del freno completo. En estos últimos se observa que la compresión que las placas aplican a los tubos no es tan extrema, sino que antes de producirse el agrietamiento del tubo son los cables los que asumen la carga y se deforman en consecuencia hasta la rotura.

Asumiendo que los tubos no van a sufrir agrietamiento si forman parte de un sistema de frenado como el que se está diseñando, se decide que la inclusión de modelos de daño del material en las simulaciones por elementos finitos no haría más que incrementar la complejidad del problema sin aportar ninguna mejora a los resultados.

4.5 Calibración de los modelos numéricos a partir del ensayo estático

4.5.1 Cable del freno

Mientras que en las anteriores simulaciones se suponía un cable rígido, este nuevo proceso requiere una simulación más precisa de todos los componentes.

En los ensayos experimentales se comprobó que los cables sufren cierta flexión debido a la excentricidad de las cargas. Esto produce una cierta inclinación de las placas que actúan como topes y por tanto en la aplicación de la compresión en las mismas para que se efectúe el aplastamiento de los tubos.

La definición de un cable que incluya todos y cada uno de los alambres que lo componen se descarta debido a la complejidad geométrica y a la gran cantidad de contactos que sería necesario implementar en el modelo numérico. Esto provocaría un incremento del tiempo computacional inasumible, por lo que se cree que la mejor alternativa es la creación de un modelo simplificado equivalente. Dicho modelo deberá ser creado y verificado antes de incluirlo en el modelo completo del freno. Por ello, se decide imitar numéricamente el ensayo de tracción definido en el apartado 5.3.2.1. El modelo simplificado tiene forma cilíndrica, con un diámetro de 16 mm y una longitud igual a la utilizada en el ensayo real, de 680 mm.

Para definir el material se emplea la curva tensión-deformación experimental del cable. La tensión se obtiene realizando el cociente entre la fuerza resultante en cada punto y el área equivalente ($A_{eq} = \frac{\pi\phi^2}{4}$ donde $\phi = 16\text{ mm}$). Además, en los cálculos explícitos de elementos finitos es necesario introducir los valores “verdaderos” de tensión y deformación, según las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_{true} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad [1]$$

$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon) \quad [2]$$

Realizando las transformaciones mencionadas se obtiene un módulo elástico de 51712 MPa, y una curva de comportamiento plástico según la Tabla 31.

Tabla 31. Coordenadas de deformación plástica real y tensión real introducidas en el modelo FEM del cable.

| $\epsilon_{plastic\ true}$ (mm/mm) | σ_{true} (MPa) |
|---------------------------------------|--------------------------|
| 0,0000 | 606,09 |
| 0,0016 | 759,05 |
| 0,0026 | 814,39 |
| 0,0045 | 868,76 |
| 0,0058 | 894,04 |
| 0,0076 | 920,02 |
| 0,0108 | 952,22 |
| 0,0160 | 980,63 |
| 0,0263 | 1003,80 |

Comparando la curva real carga-desplazamiento con la curva obtenida numéricamente se observa una buena correspondencia entre las mismas, lo que permite el uso del modelo simplificado equivalente del cable en el modelo de freno completo.

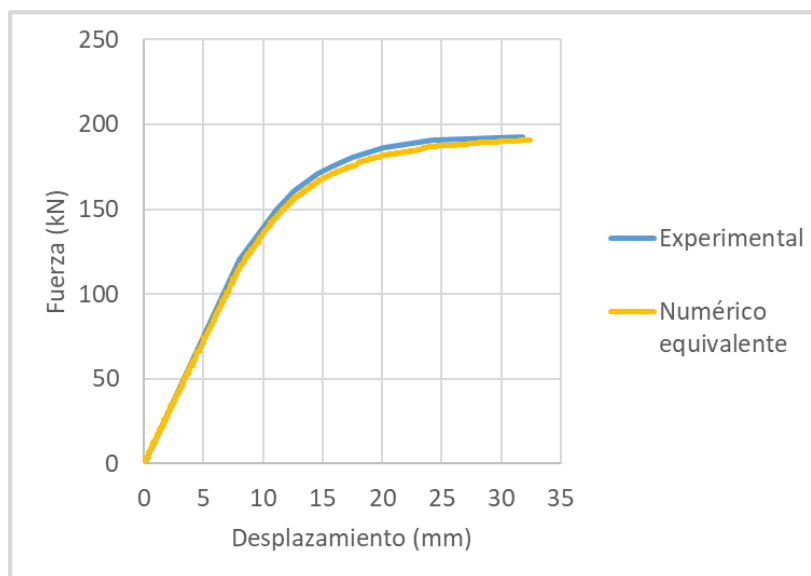


Figura 121. Gráfica Fuerza-Desplazamiento comparativa entre el ensayo experimental de un cable y la simulación numérica equivalente.

4.5.2 Tubos metálicos

El primer cálculo para la calibración se realizó con una malla de elementos hexaédricos (2 elementos por espesor) con integración reducida debido al gran ahorro de tiempo de cálculo que esta elección presenta frente a otro tipo de elementos. Al inicio de la simulación los resultados son similares al caso experimental. Sin embargo, debido a la gran deformación sufrida por el tubo,

en la parte final comienza a aparecer el fenómeno conocido como hourglassing (Figura 122). El hourglassing es un modo de deformación ficticio (no se da en la realidad) que produce valores de deformación y tensión nulos. Este fenómeno es fácilmente reconocible pues presenta una deformación de los elementos como los que se muestran en la Figura 122.

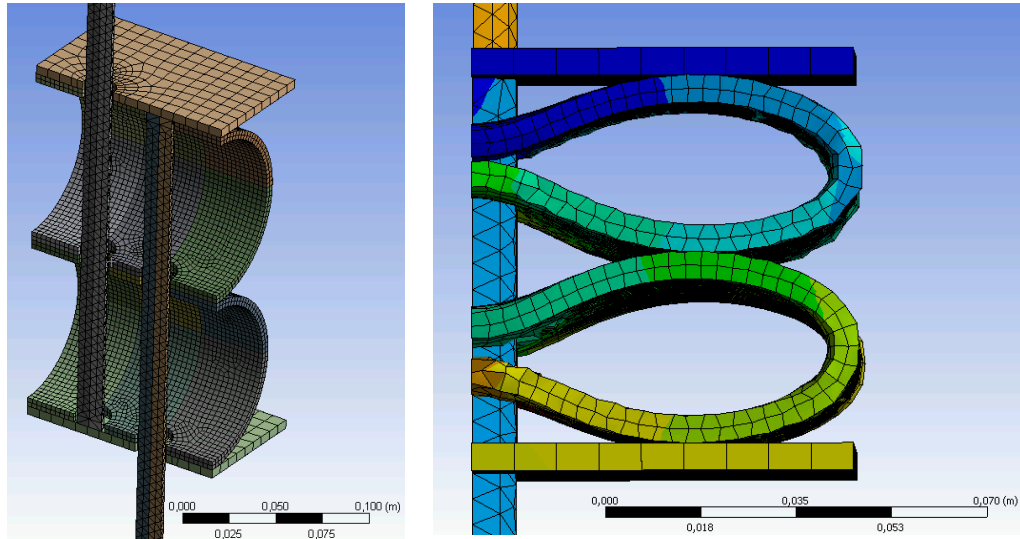


Figura 122. Malla inicial empleada en el modelo de elementos finitos (izda.) y fenómeno de hourglassing consecuencia de una errónea selección de malla (dcha.).

El cálculo se para automáticamente porque el porcentaje de error en la energía total es superior al 10%.

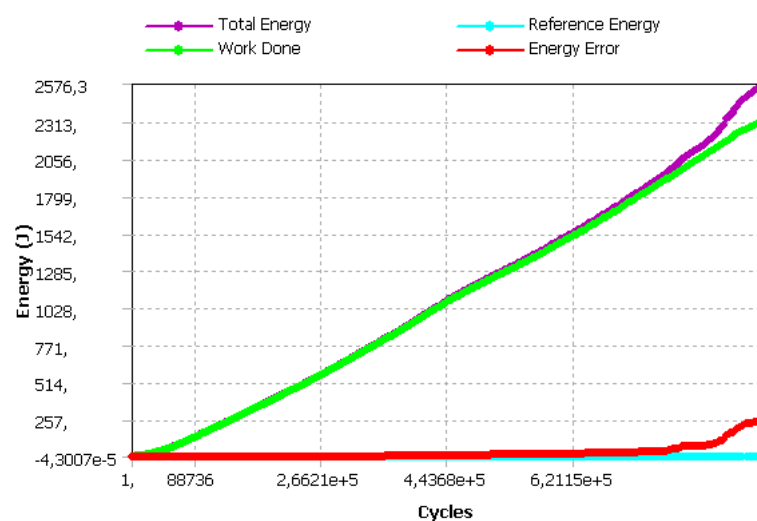


Figura 123. Gráfica aportada por el software en el que se observa el trabajo realizado por el sistema (en verde) y el error de energía que provoca la finalización del cálculo prematuramente (en rojo).

Las posibles soluciones para eliminar el hourglassing del modelo son:

- Aumento del número de elementos por espesor: esto significaría disminuir el tamaño de elemento, ya que el mínimo número recomendado por espesor es 4. Haciendo esta reducción y tomando 4 elementos por espesor el fenómeno de hourglassing sigue apareciendo. Se descarta seguir aumentando el número de elementos por espesor debido al gran incremento en el coste computacional (190h).
- Integración completa en lugar de integración reducida: esta alternativa aumenta inasumiblemente el coste computacional.
- Empleo de elementos tetraédricos en lugar de hexaédricos: esta fue la solución adoptada, pues aumenta el coste computacional pero no en exceso. La simulación tarda una media de 13 horas en completarse.

En cuanto al tipo de material, se emplea una ley elasto-plástica isotrópica. Al igual que ocurre con en la introducción del material correspondiente al cable, en este caso también habrá que emplear los valores de tensión y deformación verdadera. El módulo elástico es de 210540,9 MPa. La zona plástica de la curva se caracteriza con los valores de la Tabla 32.

Tabla 32. Coordenadas de deformación plástica real y tensión real introducidas en el modelo FEM de los tubos.

| | $\varepsilon_{plastic\ true}$ | σ_{true} |
|---|-------------------------------|-----------------|
| 1 | 0 | 360 MPa |
| 2 | 0,19532 | 744 MPa |

4.5.3 Resultados

En la Figura 124 se representan las curvas experimental y numérica de un freno de 2 tubos de 101,6 mm de diámetro y 5 mm de espesor. La concordancia entre ambas curvas es muy alta, incluso en la zona final, en la que las reacciones experimentadas por el freno son prácticamente debidas a la resistencia de los cables. La vibración en la curva carga-desplazamiento numérica se debe a la simplificación adoptada de placas rígidas. Esto provoca que la fricción entre placa y cable se produzca a trompicones y no como ocurre realmente de forma más suavizada por el desgaste que se produce en la arista del orificio de la placa (Figura 120).

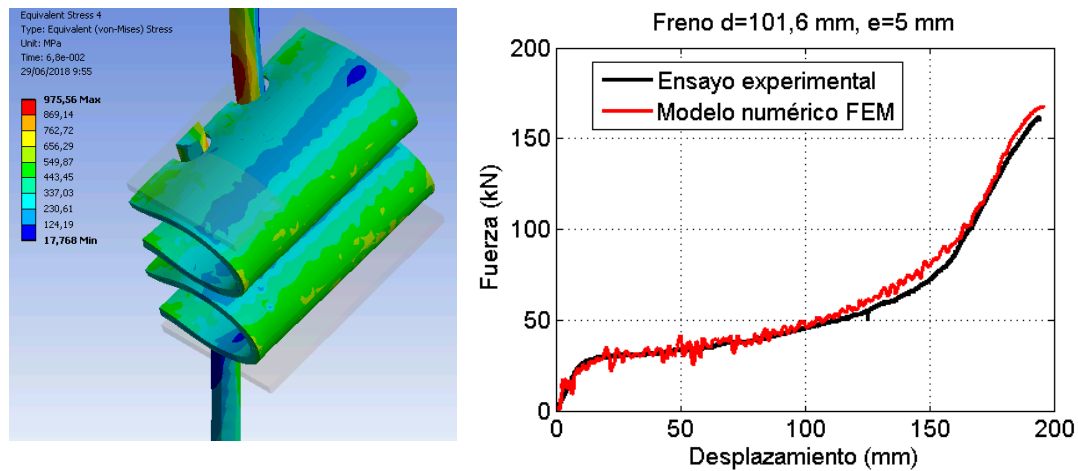


Figura 124. Gráfica Fuerza-desplazamiento de un freno de dos tubos de diámetro exterior 101,6 mm y espesor 5 mm. Comparación del ensayo experimental y la simulación FEM.

4.6 Selección de la geometría final

Empleando el modelo calibrado de base, se realizan 3 modelos similares variando diámetros y espesores de los tubos. El primero de ellos tiene una geometría ya ensayada dinámicamente, con tubos de 114,3 y espesor 6,3 mm. Los otros dos tienen el mismo diámetro exterior de 133 mm y lo único que varía es el espesor, entre 8 y 10 mm. Un resumen de las dimensiones se muestra en la Tabla 33.

Tabla 33. Dimensiones de los tubos de los frenos simulados numéricamente.

| | Diámetro | Espesor (mm) |
|----------------|----------|--------------|
| 1 (referencia) | 101,6 | 5 |
| 2 | 114,3 | 6,3 |
| 3 | 133 | 8 |
| 4 | 133 | 10 |

Las medidas se seleccionan conforme al catálogo de tubos de calidad S355 J2 (ST52) de la compañía Sertesa, catálogo similar al de resto de compañías de venta de barra perforada. Se tiende a aumentar el diámetro de los tubos del freno para buscar una mayor energía del mismo, aunque se decide limitar el diámetro a 133 mm ya que la idea inicial del freno se basaba en la esbeltez del mismo. Aumentando el diámetro por encima de este valor se perdería este concepto, además de aumentar considerablemente el peso del freno. Todos los modelos están formados por dos tubos. El modelo se extrapolará posteriormente a un caso con un mayor número de tubos.

Los modelos simulados se muestran en la gráfica de la Figura 125. En ellos se observa que el freno con mayor energía de activación corresponde al del tubo de diámetro 133 mm y espesor 10, seguido del de diámetro 133 mm y espesor 8. Además, son los que mayor energía disipan de entre los cuatro estudiados (Tabla 34). Pese a que se persigue la optimización de la cantidad de material, los resultados indican los frenos con menores dimensiones, aun siendo los que más energía absorben por kg de material, tienen una capacidad disipativa en términos absolutos 26% más baja (en el mejor de los casos) que los frenos de diámetro 133 mm. Por ello se decide ensayar experimentalmente los dos frenos de mayor capacidad disipativa. Además, es necesario corroborar si la energía de rotura de los frenos con estas dimensiones de tubos va a ser similar a la obtenida experimentalmente en el freno de diámetro 101,6 mm, o si, por el contrario, existe alguna dependencia con las dimensiones.

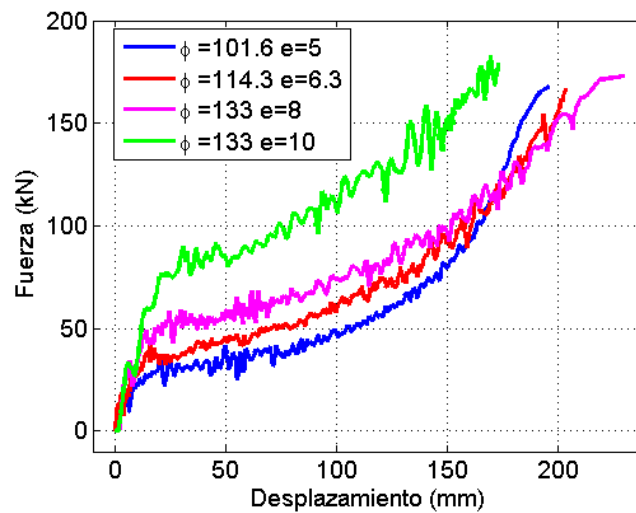


Figura 125. Gráfica Fuerza-desplazamiento de todos los frenos simulados numéricamente.

Tabla 34. Energía disipada por los frenos simulados numéricamente.

| | Energía 2 tubos (kJ) | Masa por metro de tubo (kg/m) | Masa de 2 tubos (kg) | Energía/Masa (kJ/kg) | Extrapolación energía 6 tubos (kJ) |
|--|----------------------|-------------------------------|----------------------|----------------------|------------------------------------|
| $d = 101,6 \text{ mm}$ $e = 5 \text{ mm}$ | 11,8 | 12,2 | 2,928 | 4,03 | 33,6 |
| $d = 114,3 \text{ mm}$ $e = 6,3 \text{ mm}$ | 14,6 | 17,2 | 4,128 | 3,53 | 48 |
| $d = 133 \text{ mm}$ $e = 8 \text{ mm}$ | 19,8 | 25,2 | 6,048 | 3,27 | 63 |
| $d = 133 \text{ mm}$ $e = 10 \text{ mm}$ | 20,5 | 30,9 | 7,416 | 2,76 | 66 |

Los resultados de los nuevos ensayos experimentales se pueden observar en la Figura 126 junto con sus respectivas simulaciones numéricas. Se comprueba que estas representan un comportamiento muy fidedigno.

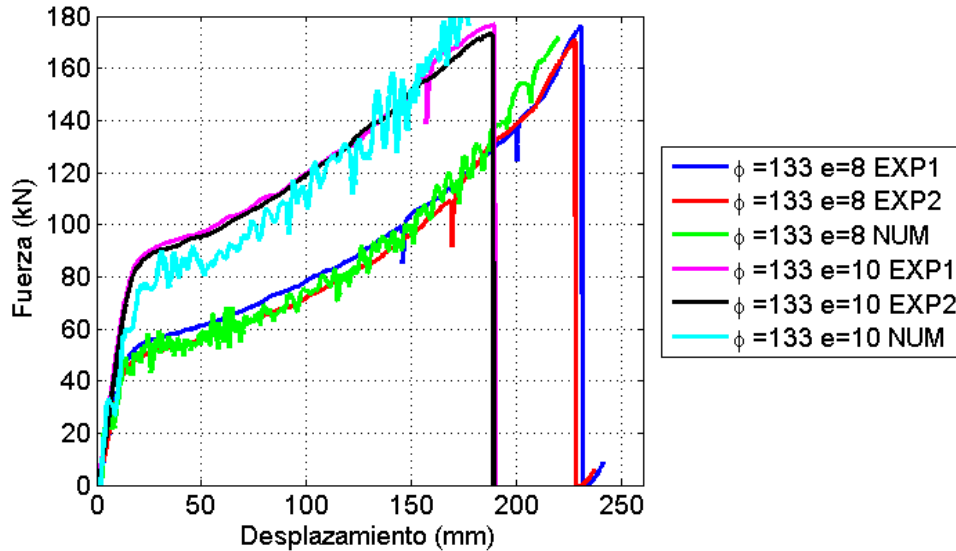


Figura 126. Gráfica Fuerza-desplazamiento del ensayo estático y comparativa con las curvas FEM de los dos frenos.

a) Freno con tubos de diámetro 133 mm y espesor 8 mm



b) Freno con tubos de diámetro 133 mm y espesor 10 mm



Figura 127. Estado de compresión de los tubos al final del ensayo estático en tubos de diámetro exterior 133 mm a) y espesor 8 mm, y b) espesor 10 mm.

La carga de rotura del freno es aproximadamente el mismo (170-175 kN). El área bajo la curva carga-desplazamiento es la que proporciona los valores de energía absorbida y determinará cual será el freno seleccionado para su utilización en el diseño de la pantalla. Realizando dicha operación, resulta que existe muy poca diferencia en las energías, siendo en el caso del freno con tubos de 8 mm 20 y 21 kJ y en el caso del freno con tubos de 10 mm 21 y 22 kJ.

La decisión de qué freno se seleccionará para su uso en la pantalla final se tomará entonces en base a su eficiencia por unidad de masa, recalculada a partir de las curvas reales fuerza-desplazamiento. Teniendo en cuenta que la masa de los tubos de diámetro 8 mm es de 25,2 kg/m y la de los tubos de 10 mm de espesor es de 30,9 kg/m se obtienen unas eficiencias de 3,5 y 2,83 kJ/kg respectivamente. Además, observando la Figura 127 se observa que para los frenos con tubos de mayor diámetro la rotura del cable se produce antes de que la compresión de los tubos sea completa. En conclusión, el freno que se utilizará en el diseño de la pantalla llevará tubos de diámetro 133 mm y espesor 8 mm.

En un futuro se planteará utilizar los tubos de diámetro 133 mm y espesor 10 mm con un cable de mayor diámetro. En concreto, incrementando en 4 mm el diámetro del cable, de 16 a 20 mm, la carga máxima del mismo se incrementa desde 200 kN hasta los 325 kN. Pese a este gran incremento se sabe que los cables rompen antes de su tensión última. En los frenos ensayados, que contienen cable de 16 mm, estos rompen al 85% de su carga máxima. Si extrapolamos este valor al caso de cable de diámetro 20 mm, se obtendría un valor de carga máxima 276 kN para el cable, lo que permitiría a los tubos de espesor 10 mm comprimirse en mayor medida que los ensayados con cable de diámetro de 16 aprovechado su capacidad disipativa completa. El aumento del diámetro de los cables supondría el aumento del diámetro de los orificios. Esto reduciría ligeramente la capacidad de absorción de los tubos, por lo que se considera necesario realizar ensayos estáticos para obtener datos reales concretos. Este estudio no se ha considerado en esta tesis, y se planteará su desarrollo para pantallas dinámicas de mayor capacidad energética.

5 Análisis paramétrico mediante DoE y selección de las dimensiones

5.1 Introducción

Es una práctica común que los productores de pantallas vendan sus productos ofertando variaciones sobre la pantalla ensayada y certificada, sin tener en cuenta que ciertas modificaciones pueden afectar negativamente a la capacidad energética de las mismas. El estudio de varios parámetros relacionados con la geometría e instalación de la pantalla ayudará a comprender de qué manera puede fallar y en qué puntos de la misma (red, cables perimetrales, postes, vientos, etc.). Un estudio similar se realizó a las pantallas IBT-150 e IBT-500, y se puede encontrar en Castanon-Jano et al. 2018. En el caso de la pantalla que se va a diseñar, en la que ya se ha seleccionado malla de intercepción (MT15000) y frenos (de tubos en serie), el estudio paramétrico contribuirá a la selección apropiada y justificada de la forma definitiva de la pantalla completa. En esta ocasión, se mejora el proceso de selección de los modelos empleando para ello el método llamado Diseño de Experimentos (DoE).

5.2 Creación del DoE

5.2.1 Definición de Diseño de Experimentos (DoE)

El diseño de experimentos es un método estadístico que permite estudiar el efecto que sobre la 'variable respuesta' tiene un conjunto de otras variables que pueden influir en la variable de respuesta denominándose de 'factores'.

5.2.2 Variables y factores del diseño factorial

En nuestro caso, se identifican todos los componentes:

Variable respuesta:

- **Energía máxima a la que la pantalla deja de ser capaz de retener el bloque.**

Factores:

- **Longitud de cada paño:** entre 8 y 12 metros. Los fabricantes ofrecen un rango de longitudes entre postes para sus productos debido a que, en ocasiones, no es posible la instalación de los postes a la longitud de referencia, debido a obstáculos en el suelo o a la forma y consistencia del suelo. Esta longitud de referencia suele ser generalmente de 10 metros, y es la distancia entre postes de las pantallas certificadas mediante la guía ETAG 027. En este apartado se estudiará la influencia de la longitud entre postes de cada paño ya que se cree que puede existir influencia en la energía final.
- **Anchura de cada paño:** entre 3 y 5 metros. A igual longitud de los paños, se cree que la anchura de estos hace variar en gran medida la energía máxima. Por ello se selecciona como un factor a estudiar.
- **La distancia en la que la malla está descosida del cable perimetral a ambos lados del poste:** entre 0,5 y 1 m de cada lado del poste. Después del estudio del estado del arte existente de otras pantallas y de varias simulaciones numéricas iniciales realizadas a varias estructuras de este tipo, se observa que cuanto más liberada se encuentre la malla alrededor del poste, mayor va a ser el desplazamiento de la malla hacia la zona de impacto y, por tanto, mayor tiempo de impacto reduciendo las cargas en los componentes. La consecuencia última sería una mayor energía máxima de absorción de la pantalla. Es por esto por lo que se quiere estudiar en qué medida influye este factor. El valor máximo de descosido se limita a 1 metro ya que en la guía ETAG 027 se establece que después del primer ensayo SEL la anchura de la malla en los postes debe ser mayor que la altura residual de la pantalla.

- **La localización de los frenos:** solo en los cables laterales o tanto en los laterales como en los superiores. Es evidente que cuanto mayor sea el número de frenos mayor capacidad disipativa va a tener la pantalla completa. En este DoE se incluye este factor con el objetivo que estudiar la magnitud de su influencia.

Existen otros factores que se han fijado ya que, de no ser así, se generarían una cantidad de experimentos a realizar excesivamente elevada, que implicaría varios meses de simulaciones numéricas, lo cual se escapa de la duración de esta tesis. Estos son el número de vientos por poste, el diámetro del cable y las propiedades del freno. La elección de un solo viento superior por poste se selecciona ya que, de esa manera los vientos no se proyectan totalmente sobre el área de impacto. El diámetro del cable se ha fijado a 16 mm, valor que se encuentra dentro del rango de diámetros empleados en las pantallas dinámicas, tal y como se observa en las tablas del apartado 2.3 de la presente tesis. Los resultados del diseño de experimentos dirán si el diámetro seleccionado es suficiente, o por el contrario se debería aumentar para evitar colapsos de la pantalla por rotura de dicho cable.

El comportamiento del freno se define en la Figura 128 y se corresponde a la curva de un freno de 6 tubos obtenida al extrapolar los resultados del freno de 2 tubos diseñado y estudiado en el apartado anterior.

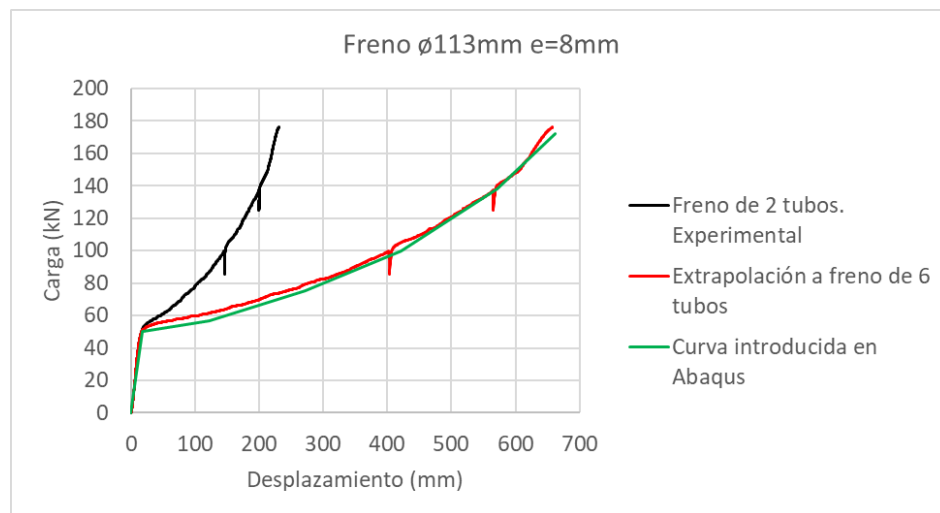


Figura 128. Curvas características de un freno de tubos de diámetro exterior 113 mm y espesor 8 mm. Curva experimental de 2 tubos, curva extrapolada al caso de 6 tubos y curva introducida al modelo de elementos finitos.

Cada uno de los experimentos es implementado en el software Abaqus. Los modelos se realizan de forma similar a los incluidos en el apartado 3.5.2, añadiendo los frenos donde correspondan

para cada modelo empleando conectores de tipo axial con la curva descrita en la Figura 128. Todos los cables y la malla de alambre se modelizan con elementos tipo truss (sin rigidez a flexión).

Su energía de ruptura se obtendrá, al igual que ya se hizo en el capítulo “Estudio de las redes de intercepción”, aumentando la velocidad inicial del bloque hasta obtener aquella velocidad que provoca la ruptura de alguno de sus elementos clave: malla en la zona de impacto, cables perimetrales o cables premontados. El bloque tendrá una masa de 1429 kg y densidad 2500 kg. Siguiendo el razonamiento descrito en la sección 3.5.2.2. se utilizará un bloque esférico.

Tabla 35. Diseño de experimentos para el análisis de la pantalla dinámica.

| Orden | Longitud | Ancho | Cosido | Ubicación Freno |
|-------|----------|-------|--------|--------------------------------|
| 1 | 8 | 3 | 0.5 | Vientos laterales y superiores |
| 2 | 12 | 3 | 0.5 | Vientos laterales y superiores |
| 3 | 8 | 5 | 0.5 | Vientos laterales y superiores |
| 4 | 12 | 5 | 0.5 | Vientos laterales y superiores |
| 5 | 8 | 3 | 1 | Vientos laterales y superiores |
| 6 | 12 | 3 | 1 | Vientos laterales y superiores |
| 7 | 8 | 5 | 1 | Vientos laterales y superiores |
| 8 | 12 | 5 | 1 | Vientos laterales y superiores |
| 9 | 8 | 3 | 0.5 | Vientos laterales |
| 10 | 12 | 3 | 0.5 | Vientos laterales |
| 11 | 8 | 5 | 0.5 | Vientos laterales |
| 12 | 12 | 5 | 0.5 | Vientos laterales |
| 13 | 8 | 3 | 1 | Vientos laterales |
| 14 | 12 | 3 | 1 | Vientos laterales |
| 15 | 8 | 5 | 1 | Vientos laterales |
| 16 | 12 | 5 | 1 | Vientos laterales |
| 17 | 10 | 4 | 0.75 | Vientos laterales y superiores |
| 18 | 10 | 4 | 0.75 | Vientos laterales |

5.2.3 Resultados

Cada una de las respuestas obtenidas en el DOE es estudiada por separado, analizando la influencia de los factores independientes y de la interacción entre ellos.

Tabla 36. Resultados del diseño de experimentos alcanzados mediante simulación numérica FEM.

| Orden | Energía máxima (kJ) | Ubicación de la rotura |
|-------|---------------------|---------------------------|
| 1 | 331,3 | Malla |
| 2 | 499,6 | Malla |
| 3 | 427,6 | Cable Premontado |
| 4 | 622,5 | Cable Premontado |
| 5 | 393,6 | Malla |
| 6 | 533,6 | Malla |
| 7 | 575,7 | Cable Premontado |
| 8 | 622,5 | Cable Perimetral Inferior |
| 9 | 274,9 | Malla |
| 10 | 429,1 | Malla |
| 11 | 333,1 | Cable Premontado |
| 12 | 622,5 | Cable Premontado |
| 13 | 331,4 | Malla |
| 14 | 499,4 | Malla |
| 15 | 397 | Cable Premontado |
| 16 | 594,3 | Cable Perimetral Inferior |
| 17 | 484 | Cable Premontado |
| 18 | 466,4 | Malla |

Este estudio se realiza con la ayuda del software de carácter estadístico Minitab 17.

El primer análisis de regresión se realiza sobre una mezcla de variables cuantitativas (longitud, ancho y cosido) y cualitativas (localización de los frenos). En el caso del factor cualitativo “Ubicación freno” este adquiere el valor -1 cuando estos se localizan en los vientos laterales y superiores y +1 cuando únicamente se coloquen en los vientos laterales.

El cálculo del modelo de regresión se realiza comenzando con todos los factores (e interacciones entre ellos), y eliminando en cada paso el menos significativo. El cálculo finaliza cuando se obtiene un p-valor menor que el 0.05. Este sistema de obtención de los parámetros influyentes se denomina “Backward Elimination”.

Se realizan dos ajustes de regresión, en el primero incluyendo únicamente términos con interacciones de segundo orden como máximo y el segundo, en el que se incluyen interacciones de factores hasta tercer orden. El coeficiente R^2 (o coeficiente de determinación) determina la bondad del ajuste en cada caso. Este valor tiene el inconveniente de que es mayor cuanto mayor sea el número de términos que aparezcan en la ecuación por lo que podría resultar ciertamente

engañoso. Por el contrario, el indicador R^2 ajustado penaliza la inclusión de variables que apenas tienen influencia en los resultados por lo que se considera más adecuado que el anterior. Adicionalmente se observa el indicador denominado R^2 predictivo, que evalúa la capacidad de la ecuación de regresión para predecir comportamientos. Este valor se calcula eliminando uno de los modelos del conjunto de datos y estimando el resultado mediante la ecuación de regresión.

Hasta 2° orden:

Regression Equation in Uncoded Units

$$E_{max} = -497 + 66,3 LONG + 56,39 ANCHO + 420 COSIDO - 111,0 FRENOS - 31,8 LONG * COSIDO + 8,09 LONG * FRENOS$$

$$R^2 = 94,81\%$$

$$R^2_{ajustado} = 91,97\%$$

$$R^2_{predictivo} = 85,18\%$$

En el diagrama de Pareto aparecen los efectos estandarizados, calculados restando su propia media y dividiendo por la desviación típica. En este diagrama se puede apreciar la influencia de los factores en el resultado final. En orden de mayor a menor influencia se encuentran la longitud de los paños, su anchura, la ubicación de los frenos y la distancia de cosido en las inmediaciones del poste. Por último, y casi en igual medida se encuentran la interacción entre la longitud y los frenos y la interacción entre la longitud y el cosido.

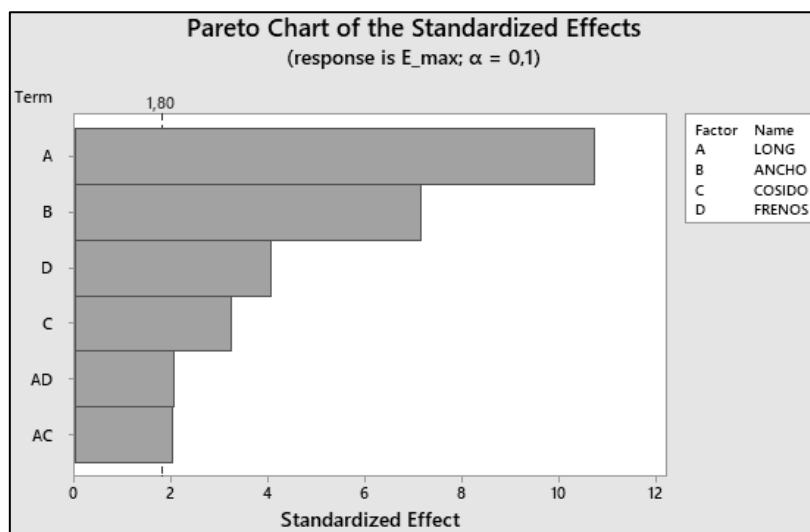


Figura 129. Diagrama de Pareto en el que se muestran los efectos estandarizados en un modelo de regresión que alcanza términos hasta un máximo de 2° orden.

Hasta 3° orden:

Regression Equation in Uncoded Units

$$E_{max} = 443 - 30,5 LONG - 178,4 ANCHO - 669 COSIDO + 197 FRENOS + 24,22 LONG * ANCHO + 81,0 LONG * COSIDO - 20,8 LONG * FRENOS + 272 ANCHO * COSIDO - 77,1 ANCHO * FRENOS - 28,2 LONG * ANCHO * COSIDO + 7,22 LONG * ANCHO * FRENOS$$

$$R^2 = 98,39\%$$

$$R^2_{ajustado} = 95,43\%$$

$$R^2_{predictivo} = 82,95\%$$

Al igual que en el anterior modelo de regresión, los factores con mayor efecto en la respuesta descritos en orden descendente son la longitud de los paños, su anchura, la localización (y número) de frenos y el cosido en las inmediaciones de los postes. También son factores influyentes la interacción entre la longitud y los frenos y la interacción entre la longitud y el cosido. En este caso también aparecen 2 términos de tercer orden que se generan por la interacción longitud-anchura-frenos y por la interacción longitud-anchura-cosido. Estos últimos términos descritos son los que menor efecto tienen sobre la respuesta, aunque según el modelo de regresión sí que son factores influyentes.

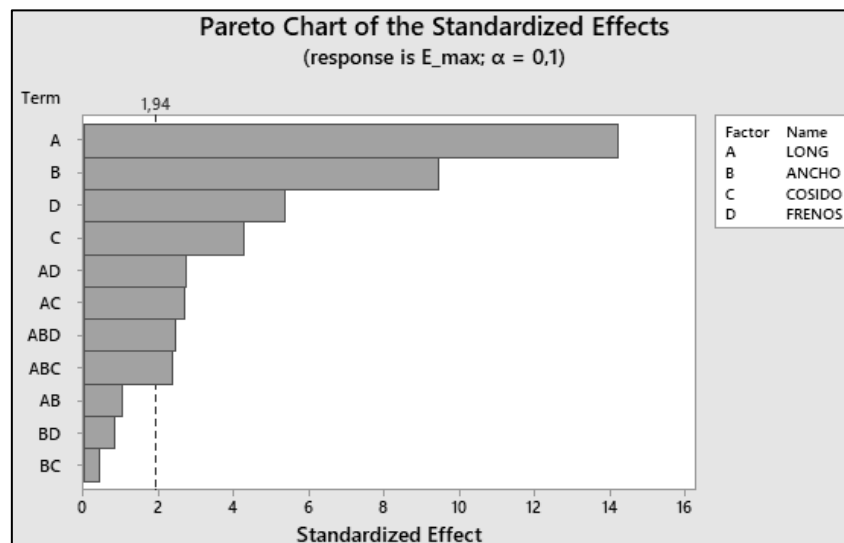


Figura 130. Diagrama de Pareto en el que se muestran los efectos estandarizados en un modelo de regresión que alcanza términos hasta un máximo de 3° orden.

Aunque con la ecuación de regresión de tercer orden se obtiene una R^2 ajustado del 95,43% frente al 91,97% en el caso con interacciones de segundo orden, el valor de R^2 predictiva es menor, por lo que se selecciona la ecuación de regresión con términos hasta segundo orden para posteriores cálculos. Todos estos valores se resumen en la Tabla 37.

Tabla 37. Tabla resumen de las ecuaciones de regresión obtenidas mediante diseño factorial.

| Ecuaciones de regresión | Indicadores de bondad del ajuste |
|---|----------------------------------|
| Hasta 2º orden | |
| $E_{max} = -497 + 66,3 LONG + 56,39 ANCHO + 420 COSIDO - 111,0 FRENOS - 31,8 LONG * COSIDO + 8,09 LONG * FRENOS$ | $R^2 = 94,81\%$ |
| | $R^2_{ajustado} = 91,97\%$ |
| | $R^2_{predictivo} = 85,18\%$ |
| Hasta 3º orden | |
| $E_{max} = 443 - 30,5 LONG - 178,4 ANCHO - 669 COSIDO + 197 FRENOS + 24,22 LONG * ANCHO + 81,0 LONG * COSIDO - 20,8 LONG * FRENOS + 272 ANCHO * COSIDO - 77,1 ANCHO * FRENOS - 28,2 LONG * ANCHO * COSIDO + 7,22 LONG * ANCHO * FRENOS$ | $R^2 = 98,39\%$ |
| | $R^2_{ajustado} = 95,43\%$ |
| | $R^2_{predictivo} = 82,95\%$ |

Puesto que los modelos de elementos finitos de las pantallas están formados por distintos componentes que se conectan entre sí para formar la estructura final completa, las rupturas de los elementos que limitan o determinan la energía máxima resistida por la pantalla no se producen siempre en el mismo componente, sino que aparecen 3 puntos críticos: la malla MT15000 en el lugar del impacto, el cable perimetral más cercano a la base y el cable premontado que se encuentra en el mismo lado (Tabla 36). El hecho de que el colapso de la pantalla no se produzca siempre de la misma manera, sino que existan distintos mecanismos es la razón fundamental por la que el indicador R^2 predictivo ve disminuido su porcentaje en ambos ajustes. En todo caso se considera que un 85,18% es un valor aceptable.

5.3 Determinación de los parámetros finales de la pantalla

Existe un amplio estado del arte en el que se muestran ensayos experimentales de pantallas dinámicas (Gentilini et al., 2012, Peila et al., 1998, Nicot et al., 2001, Moon et al., 2014). Todas ellas tienen algo en común: la longitud de los paños es de 10 metros. Con el fin de obtener ensayos experimentales comparables a los ya existentes se establece el valor de 10 m de longitud como valor final. La influencia del aumento o decremento de la longitud entre paños en pantallas que vayan a ser instaladas en un talud rocoso podrá ser medido mediante la ecuación de regresión obtenida en el DOE. En cuanto al ancho de cada paño no existe consenso entre las distintas pantallas de la literatura. Lo que sí se observa, tanto en la literatura como en las pantallas comercializadas, especificadas en el apartado 2.3 es una tendencia a un mayor ancho cuanto mayor es su energía objetivo. Esto corrobora la presencia del ancho como factor influyente en la ecuación de regresión obtenida.

A través del DOE se ha obtenido que cuanto mayor sea la longitud de descosido de la malla respecto al cable perimetral en las inmediaciones de los postes, mayor energía es capaz de absorber la pantalla. Por tanto, se utilizará una distancia de 1 metro de descosido a ambos lados del poste para las pantallas completas que se ensayarán a posteriori. Es posible que se pueda aumentar esta distancia, aunque se verá limitado por una de las condiciones necesarias para superar los ensayos de energía de servicio: después del primer impacto la anchura de la malla en los postes debe ser mayor que la altura residual (Figura 27). Por tanto, se prefiere establecer dicha distancia de 1 metro, y observar los resultados experimentales para determinar si es posible incrementar aún más esta longitud. Por último, respecto a los frenos, se incluirán en todos los vientos para maximizar la capacidad disipativa en lo referente a este factor.

Aplicando la ecuación de regresión con los valores de los parámetros seleccionados se obtiene una energía máxima de la pantalla de 523,66 kJ.

FACTORES: LONG=10; ANCHO=4; COSIDO=1; FRENOS= Vientos superiores y laterales =-1

$$E_{max} = -497 + 66,3 \cdot 10 + 56,39 \cdot 4 + 420 \cdot 1 - 111,0 \cdot (-1) - 31,8 \cdot 10 \cdot 1 + 8,09 \cdot 10 \cdot (-1) = 523,66 \text{ kJ}$$

5.4 Simulación numérica de la pantalla seleccionada

La pantalla con las dimensiones seleccionadas se simuló de la misma manera que el resto de los modelos que intervinieron en el DOE (Figura 131): idéntico tipo de y tamaño de los elementos, tamaño del bloque y método de cálculo de la energía máxima.

Finalmente se obtuvo que la energía capaz de absorber es de 513 kJ, por lo que se demuestra que la ecuación de regresión obtenida a partir del DOE ofrece resultados bastante ajustados. Esta energía la limita la ruptura del cable perimetral de la base, y tiene lugar en las cercanías de uno de los grilletes de guiado conectados a la base del poste central derecho.

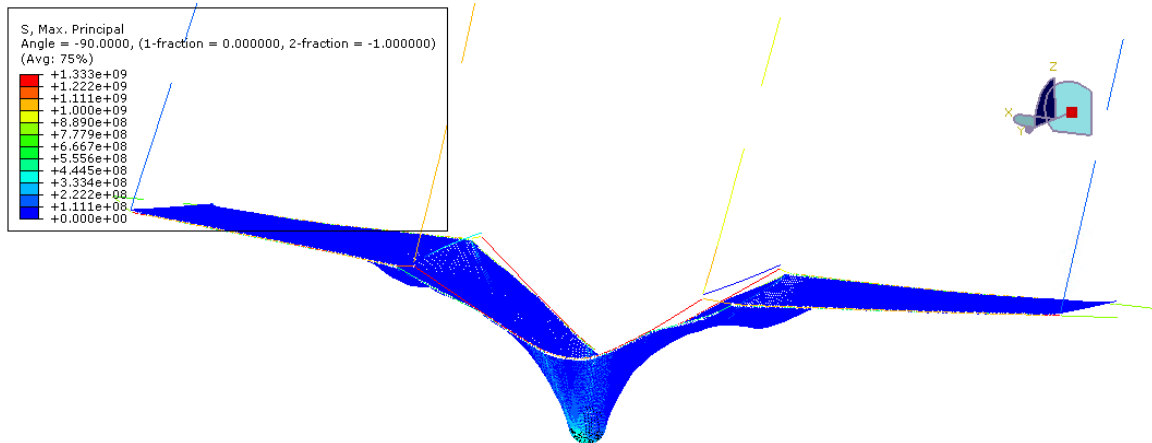


Figura 131. Modelo de pantalla completa con los parámetros seleccionados. Instante de máxima flecha.

6 Diseño de los postes

Los postes forman parte de la estructura de soporte. Según indica la guía ETAG027 los postes pueden estar hechos de diferentes materiales, diferentes geometrías y longitudes. En el diseño del poste no solo es necesario la selección del tipo de perfil, sino que también tiene gran influencia el diseño de la cabeza del poste, zona por la que discurrirá el cable perimetral superior cuyo correcto diseño es crucial para evitar concentraciones de tensiones indeseadas en los cables que provoquen la rotura prematura del mismo. Los aspectos más importantes a tener en cuenta en el proceso de diseño de esta parte del poste son:

- Se debe evitar el rozamiento de los cables con aristas vivas. Por tanto, se tratará de suavizar esquinas y utilizar perfiles circulares
- Fácil instalación e intercambio. Empleo de componentes fusibles y extraíbles.

La base del poste será la que lo conecte con la placa de anclaje mediante un perno, que irá o bien roscado con una tuerca al otro extremo o bien fijado mediante una horquilla metálica para evitar que se salga de los orificios que atraviesa. Los aspectos más importantes son:

- Debe ser capaz de resistir los esfuerzos de compresión que se generan en el poste.
- Permitir el giro del poste en el perno de conexión con la placa de anclaje sin la aparición de obstáculos o topes que provoquen su bloqueo.

6.1 Cargas consideradas

Con el fin de aplicar las cargas al poste de la forma más realista posible, se extraen los valores de las fuerzas en los cables perimetral del paño central, perimetral del paño adyacente y tirante superior, así como los ángulos que forman con los ejes, del modelo de pantalla de 10x4 m realizado

en el diseño de experimentos del capítulo anterior (la que se ha decidido que sea la geometría a fabricar) en el instante en el que la flecha es máxima. De esta forma se pueden obtener las componentes x, y y z:

- **Componente x:** Prácticamente nula por lo que no existe deslizamiento del cable perimetral en el poste.
- **Componente y:** La componente vertical y hacia abajo del cable perimetral es de 107 kN, y la componente vertical y hacia arriba del tirante que sujeta la cabeza del poste al monte (95 kN). Aunque para que exista equilibrio estas dos componentes deberían ser iguales, existe una pequeña diferencia debido a que, en el instante de máxima flecha de la pantalla, la cabeza del poste analizado podría aún tener cierto movimiento vertical y hacia abajo dado por los 10 kN de diferencia.
- **Componente z:** $30,8+37,2+58,65= 126,6$ kN en sentido negativo del eje z.

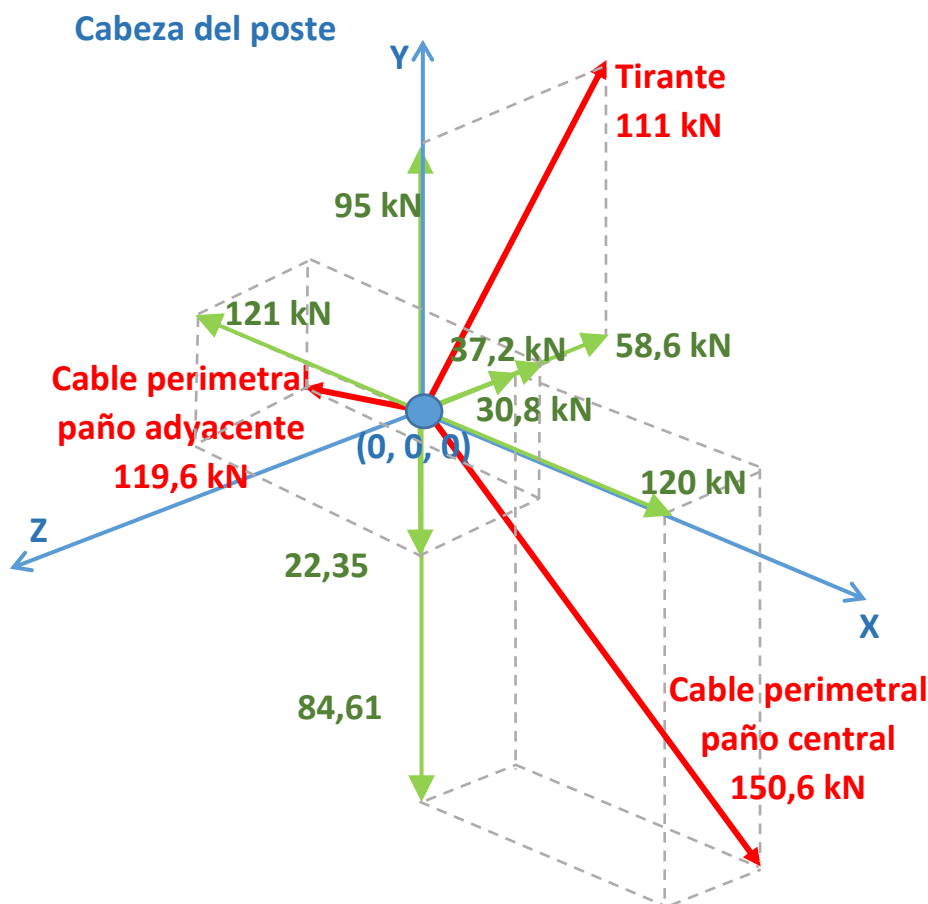


Figura 132. Esquema de la disposición de las cargas consideradas en la cabeza del poste en el instante de equilibrio del modelo de pantalla completa.

Adicionalmente, mediante la inspección visual de los ensayos realizados a anteriores pantallas pertenecientes a fabricantes como MallaTalud o Geobrugg, se sabe que los postes pueden sufrir cierta flexión y torsión debido fundamentalmente a la excentricidad de las cargas (generalmente los cables no pasan por el centro de inercia de la sección del poste). La torsión no es extraíble de las simulaciones numéricas, debido a que los postes son idealizados como elementos unidimensionales y la carga está aplicada en su centro de inercia.

La flexión suele venir dada por el empuje que experimenta la cabeza del poste provocado por el cosido de la red de cable al cable perimetral y por la transmisión de esfuerzos horizontales mediante rozamiento de este último a la cabeza del poste. Mediante la inspección visual de los ensayos realizados a las pantallas IBT-150 e IBT-500, se tiene que el desplazamiento horizontal de la cabeza de los postes centrales que provoca la flexión de los mismos es de 0,4 m en la primera y de 0,1 m en la segunda. Se decide que las simulaciones numéricas estarán solicitadas por un desplazamiento de la cabeza del poste de 0,2 m, valor intermedio entre los dos anteriores. Se cree que esta será una consideración más realista para las geometrías que nos conciernen, ya que el desplazamiento extremo de 0,4 m se produce cuando la conexión del poste al terreno permite una mayor holgura de giro. En la imagen izquierda de la Figura 133 (IBT-150) se observa que el perno solo está sujeto a la pieza de unión con el terreno mediante un orificio practicado en una pestaña que se sitúa en el centro del poste. Sin embargo, en la imagen derecha de la Figura 133 (IBT-500) se aprecia que el perno tiene el movimiento más restringido por la placa de anclaje, pues está fijado en dos chapas verticales plegadas en forma de C. Es por ello que el movimiento horizontal es mucho menor.

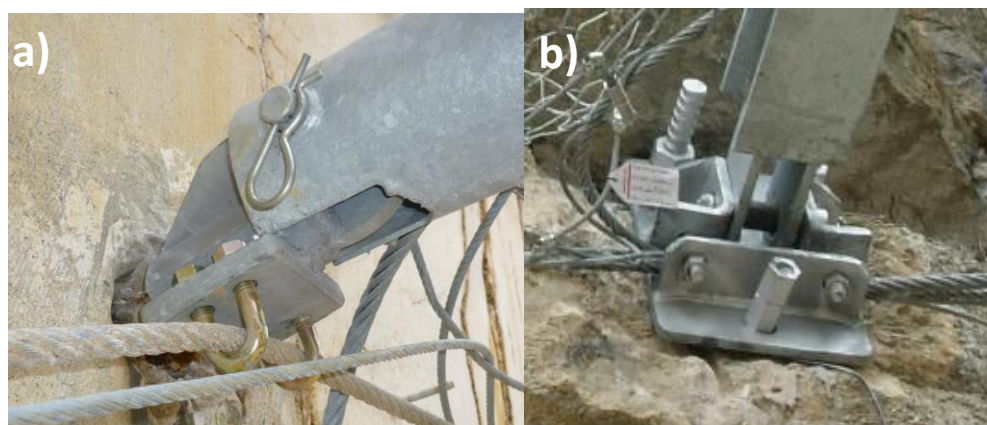


Figura 133. Detalle de la conexión del poste con el terreno a) en la pantalla IBT-150, y b) en la pantalla IBT-500.

6.2 Diseños considerados

Tal como se adelantó en el estado del arte, las pantallas existentes emplean fundamentalmente dos tipos de perfiles. En primer lugar, los perfiles HEA o HEB, perfiles estructurales de acero S275, son los más usados para pantallas de energía media alta por su alta variedad de dimensiones y su abundancia en el mercado. El punto negativo de este tipo de perfiles es que el momento de inercia en uno de los ejes del perfil es mucho mayor (en los rangos en los que nos movemos 160-140-120 del orden de 3 veces mayor) que en el eje perpendicular. Esto se traduce en que, en el caso de producirse alguna torsión en el poste o alguna fuerza en dirección del eje débil, este tendrá menos resistencia. En segundo lugar, también se usan los perfiles circulares. Estos tienen la ventaja de que los momentos de inercia en todas las direcciones del perfil son iguales. En este caso se podrá emplear tanto acero de cañería, de menor calidad o bien acero S355 ya que los tubos estructurales tienen unos espesores muy bajos que presumiblemente no son capaces de resistir las cargas impuestas.

Tres son los diseños que han sido considerados y simulados numéricamente.

6.2.1 Versión 1: HEB

La primera propuesta consiste en un poste HEB de 140 que contiene una chapa soldada en la parte superior, y agujereada para la sujeción de los tirantes. En la parte final del poste se incluyen una chapa rectangular horizontal de 100x90 mm y 10 mm de espesor y la mitad de un tubo de barra perforada de diámetro exterior 112 y espesor 8,5mm. Estas dos partes tienen la función de guiado del cable perimetral y se cierran mediante un perno de diámetro 26 mm para evitar fugas del cable. Para conectar el poste a la base se añaden dos placas de espesor 8 mm.

Se crean dos modelos partiendo de la misma idea, con las 2 posibles colocaciones del perfil HEB, que difieren en que una está girada 90 grados respecto a la otra. Tradicionalmente, los postes que disponían de perfiles HEB se colocaban de forma que tuviesen la mayor inercia en la dirección del impacto. Esto se hacía ya que en principio los postes estaban fijados a la placa de anclaje sin ningún tipo de articulación, por lo que era necesario que tuvieran la mayor resistencia a flexión posible. En la actualidad existen multitud de pantallas que utilizan perfiles HEB y en las que se ha mantenido la misma orientación que la que se utilizaba tradicionalmente pese que disponen de articulaciones en sus bases. Sin embargo, en esta tesis se estudiarán ambos casos para observar si existen diferencias apreciables.

Las cargas aplicadas son las siguientes (Figura 134): los orificios de la base del poste tienen una restricción de apoyo fijo. El orificio de la chapa soldada superior (donde se sujetará el tirante) tiene

impedido el desplazamiento vertical ($U_y=0$), y se le aplica una fuerza horizontal hacia la base del poste (F_z) de 58,6 kN (correspondiente a la fuerza que ejerce en ese sentido el viento superior que va conectado a ese orificio). La fuerza en el eje z que procede de los cables perimetrales (cuya suma es aproximadamente 60 kN) se aplica simplificada sobre la chapa que cierra el perfil en la cabeza del poste. Adicionalmente se añade un desplazamiento horizontal de 0,2 m en el extremo libre poste para comprobar la resistencia a flexión de este. Por último, para comprobar la resistencia de la zona de guiado del cable, se aplica una carga vertical (F_y) y en sentido negativo de valor 105 kN.

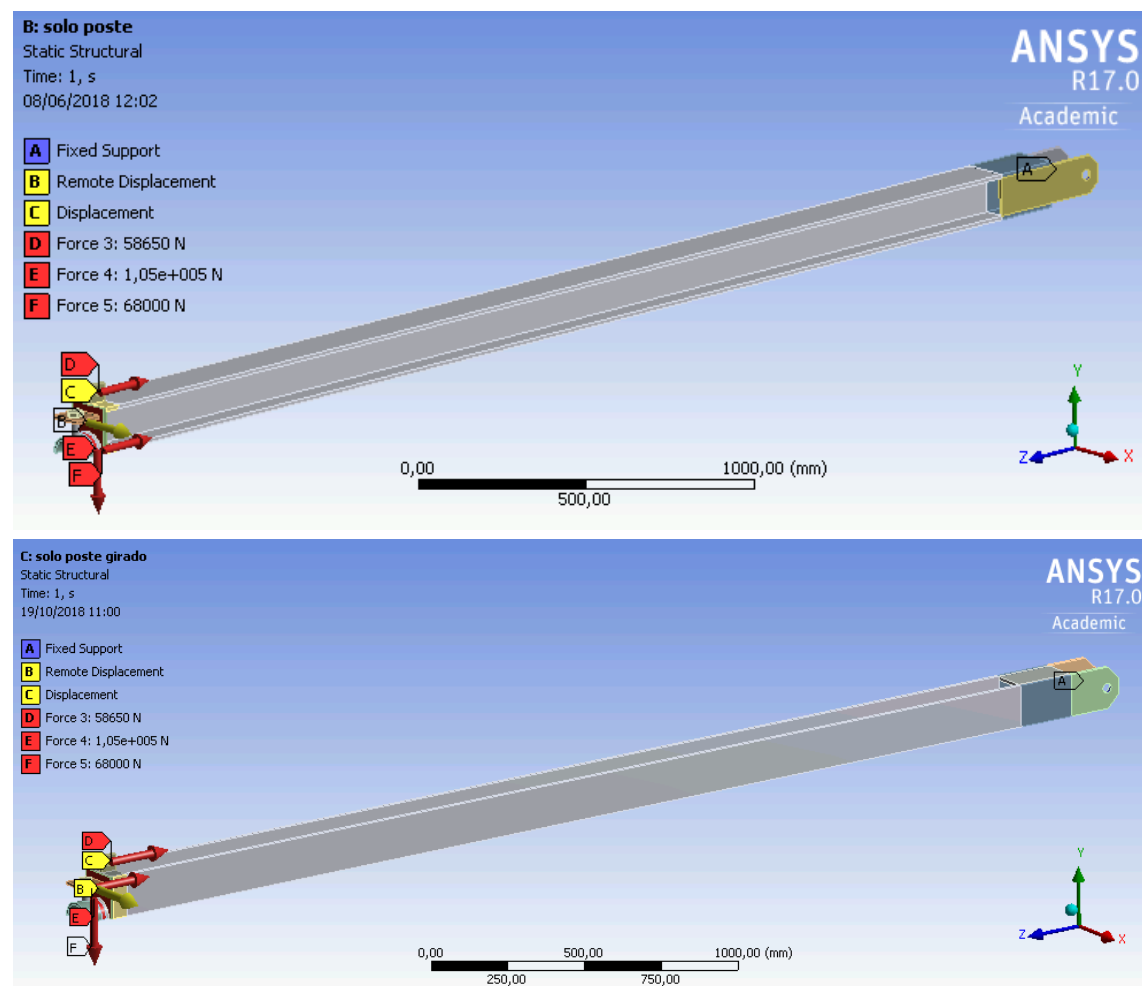


Figura 134. Geometría y cargas aplicadas al modelo numérico de poste Versión 1 con sus dos orientaciones.

La malla de elementos finitos se realiza con elemento tetrahédricos de tamaño 20 mm. Se procedió a un afinado de la malla tanto en la cabeza del poste (5 mm) como en la base del poste (10 mm y un refinado a la mitad en los orificios que conectarán con la placa de anclaje). Se utilizó el mismo mallado con los modelos en las dos orientaciones.

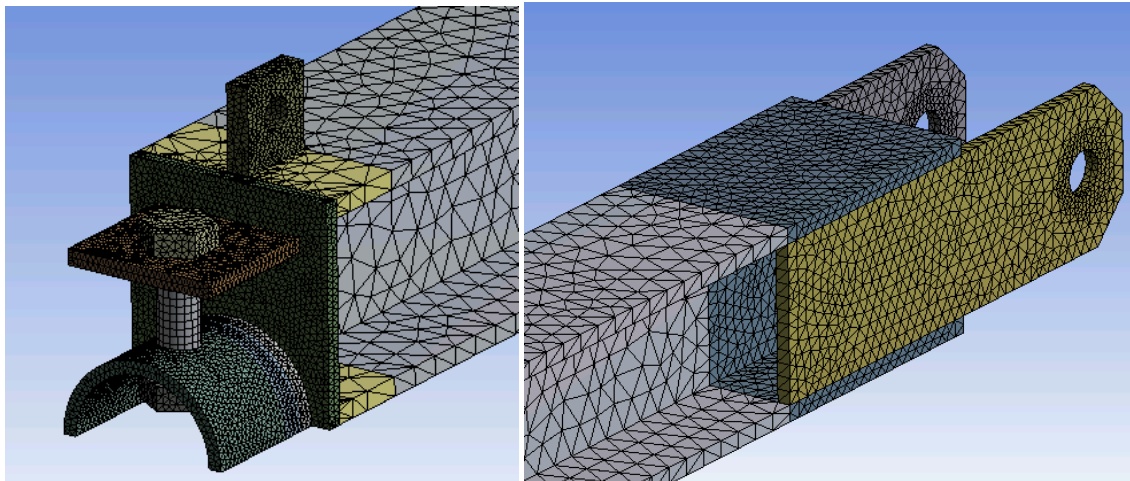


Figura 135. Mallado de la cabeza y base del poste en el modelo numérico Versión 1 en la orientación tradicional. La malla del modelo girado 90° es exactamente igual.

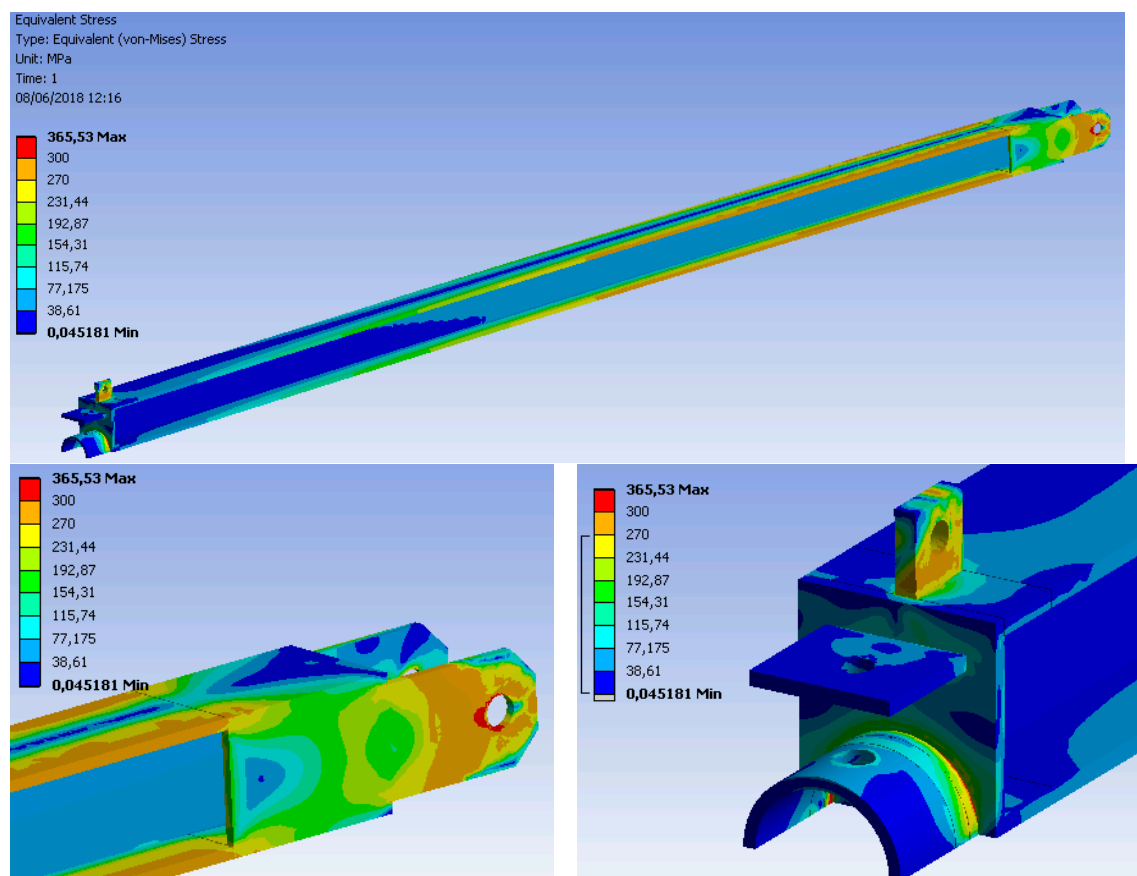


Figura 136. Tensiones de Von Mises resultantes en el poste Versión 1 a) modelo completo, b) detalle de la base del poste y c) detalle de la cabeza del poste.

En la Figura 136 se pueden observar las tensiones resultantes del modelo con la orientación tradicional. Las zonas coloreadas en naranja y rojo superan el límite elástico del acero. Sin embargo, en la mayor parte del modelo las tensiones plásticas apenas superan los 300 MPa, y solo en los orificios de la base del poste y en la unión de la pieza tubular de la cabeza del poste este valor es ligeramente mayor, llegando a los 365 MPa, siempre por debajo de la tensión de rotura del material (410 MPa).

En el modelo de la Figura 137, cuyo perfil se ha girado 90°, se comprueba que en la cabeza del poste los valores de tensión de Von Mises superan el límite elástico, pero en ningún caso llegan a la tensión de rotura de 410 MPa, e incluso no superan los 300 MPa. En la base del poste las tensiones son más altas, alcanzando incluso valores mayores a la tensión de rotura (430 MPa) por la compresión que se produce en las inmediaciones de uno de los orificios que permiten la articulación del poste. Hay que tener en cuenta que estas tensiones tan altas, que se producen en pequeñas áreas, pueden ser producidas por las excesivas restricciones en el contorno del orificio, consecuencia de la simplificación para la aplicación de las cargas. Pese a esto se obtienen resultados más desfavorables que los del poste en su posición tradicional (Figura 136).

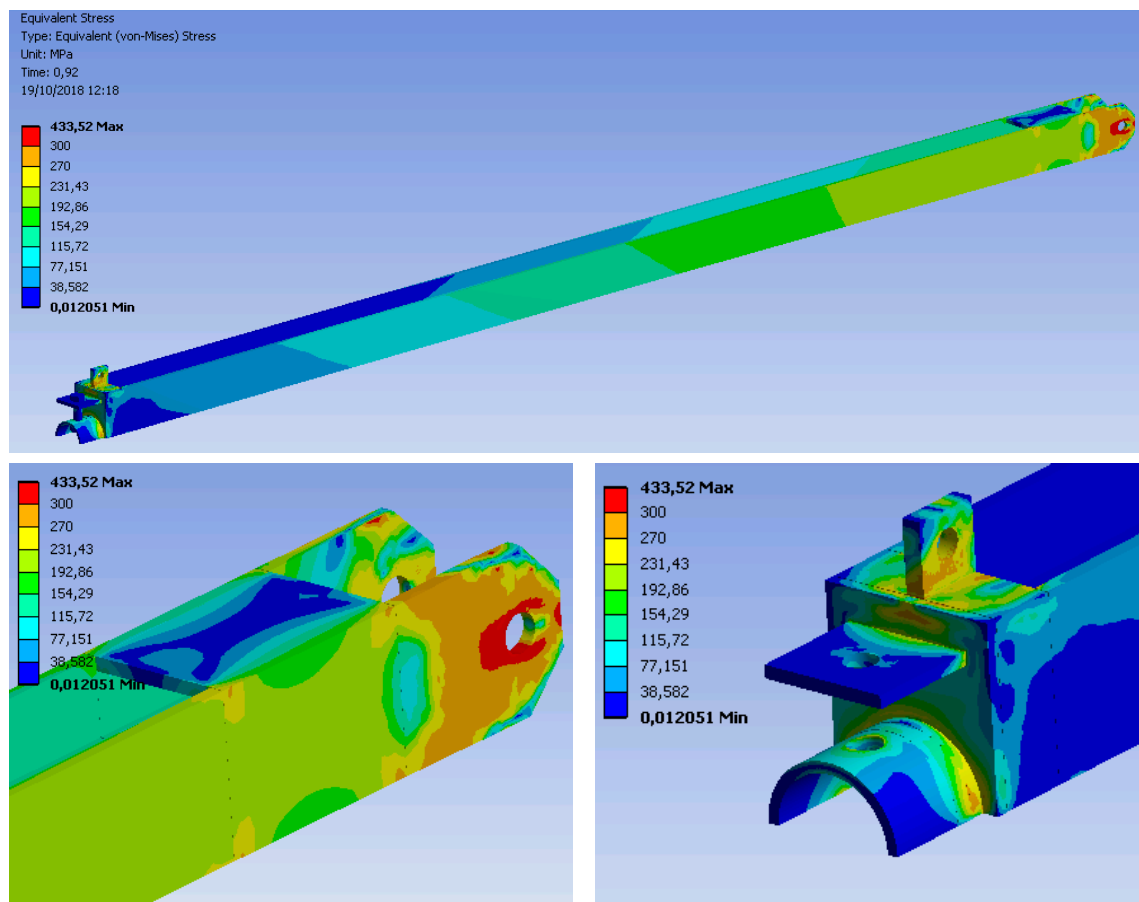


Figura 137. Tensiones de Von Mises resultantes en el poste Versión 1 girado 90° a) modelo completo, b) detalle de la base del poste y c) detalle de la cabeza del poste.

6.2.2 Versión 2: Circular I

Esta propuesta se basa en la utilización de un poste circular, atravesado verticalmente por dos pernos, que sujetan en la parte superior y en la inferior dos abrazaderas, para contener y guiar a los cables perimetrales y los tirantes.

Con esta geometría es posible distinguir dos configuraciones de los cables:

- a) Configuración A: el cable perimetral está guiado por la abrazadera superior, mientras que el tirante va fijado en la abrazadera inferior y rodea al poste. En este caso, el perno interior soporta fundamentalmente esfuerzos de cortante, mientras que las abrazaderas no sufren grandes esfuerzos ya que los cables reposan siempre sobre el poste.
- b) Configuración B: el cable perimetral está guiado por la abrazadera inferior, mientras que el tirante va fijado en la abrazadera superior rodeándola. Aquí, además de los esfuerzos cortantes debido a la dirección de las fuerzas hacia el centro del poste, aparecen esfuerzos de tracción en los pernos y en las abrazaderas.

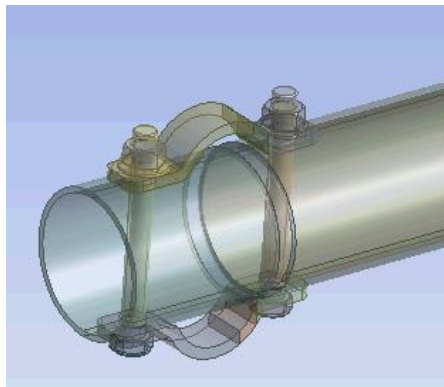


Figura 138. Diseño de la cabeza del poste mediante dos abrazaderas y dos pernos.

La configuración B se descarta inicialmente ya que, después de un pequeño cálculo inicial, se considera que las piezas de abrazadera y los tornillos van a sufrir unas tensiones de tracción muy altas, tal y como se corrobora en la Figura 139, alcanzando valores muy por encima de la de rotura del material. Además, las tensiones provocadas por la carga de cortante que sufre el perno interior superan los 1000 MPa. Por todo ello el sistema en esta disposición de cables no se considera un sistema muy fiable.

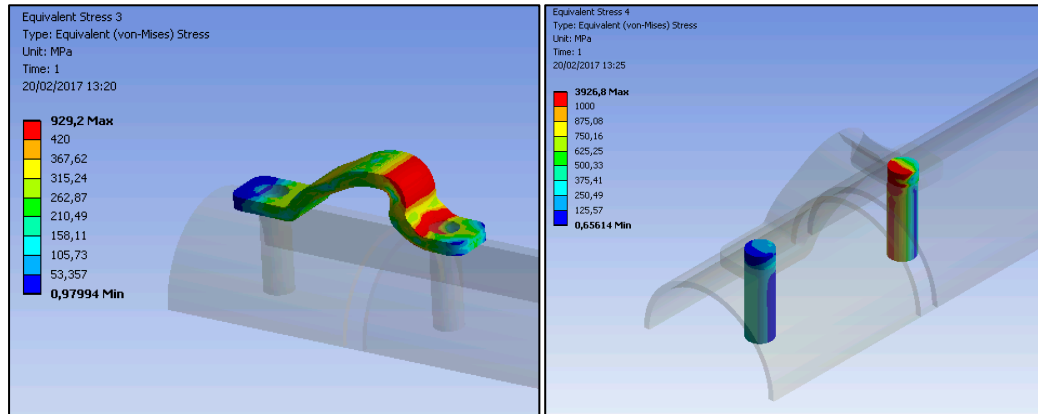


Figura 139. Distribución de tensiones de la cabeza del poste según el Caso B: a) en la abrazadera, y b) en los pernos de sujeción de la abrazadera.

Así pues, se analiza la resistencia del poste en el caso de que el cable perimetral se deslice entre el poste y la abrazadera superior, y el tirante abrace al poste siendo sujetado entre el poste y la abrazadera inferior.

El poste estará formado por tubo de cañería de calidad ASTM A-53 Gr.B, de 168,3 mm de diámetro exterior y 7,11 mm de espesor. Este material tiene un límite elástico de 240 MPa y de rotura de 410 MPa. Las abrazaderas serán de acero plegado de 10 mm de espesor y calidad A52-34ES, y los pernos tendrán un diámetro de 22 mm. La forma de conectar el poste a la placa de anclaje será perforando directamente el poste. Puesto que su espesor es menor que el de las placas utilizadas en el poste del apartado anterior se añaden unas placas planas soldadas con los mismos orificios que el poste. Estas aportarán resistencia y rigidez a la zona.

Las cargas se aplican de la siguiente manera: en primer lugar, a los orificios de la base del poste se les asigna una restricción de apoyo fijo. A ambas abrazaderas se le practican sendos cortes horizontales a una distancia de 16 mm del contorno exterior del poste tubular. Así es posible aplicar la carga únicamente en la zona de la abrazadera que está en contacto con el cable (Figura 140). Así, en la sección de la abrazadera superior (por donde discurre el cable perimetral) se aplica una fuerza de compresión hacia la base del poste de 68 kN, y en la sección de la abrazadera inferior (donde se fija el viento superior) una fuerza en la misma dirección y sentido de valor 58,6 kN. Al igual que en el poste anteriormente descrito, se añade un desplazamiento de 0.2 m en la punta del poste para comprobar su resistencia a flexión, sobre todo en la zona de la base.

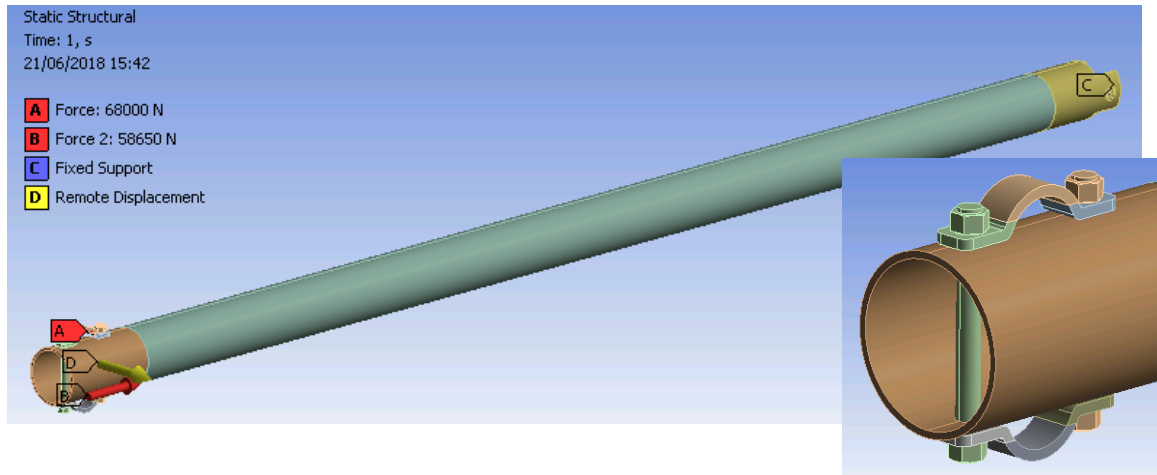


Figura 140. Geometría y cargas aplicadas al modelo numérico de poste Versión 2.

En cuanto a la malla de elementos finitos, se utilizan elementos tetraédricos de tamaño 30 mm sobre la parte central. Tanto a la cabeza como la base se les reduce la malla a 10 mm. A los orificios de la base del poste y aristas vivas de la zona se les aplica un refinamiento de 5 mm. Por último, las abrazaderas y los pernos tienen un tamaño de 5 y 3 mm respectivamente.

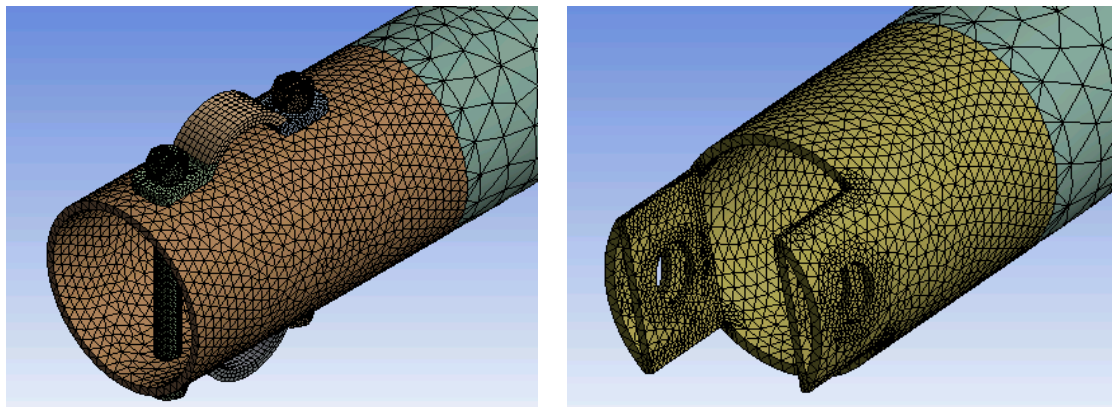


Figura 141. Mallado de la cabeza y base del poste en el modelo numérico Versión 2.

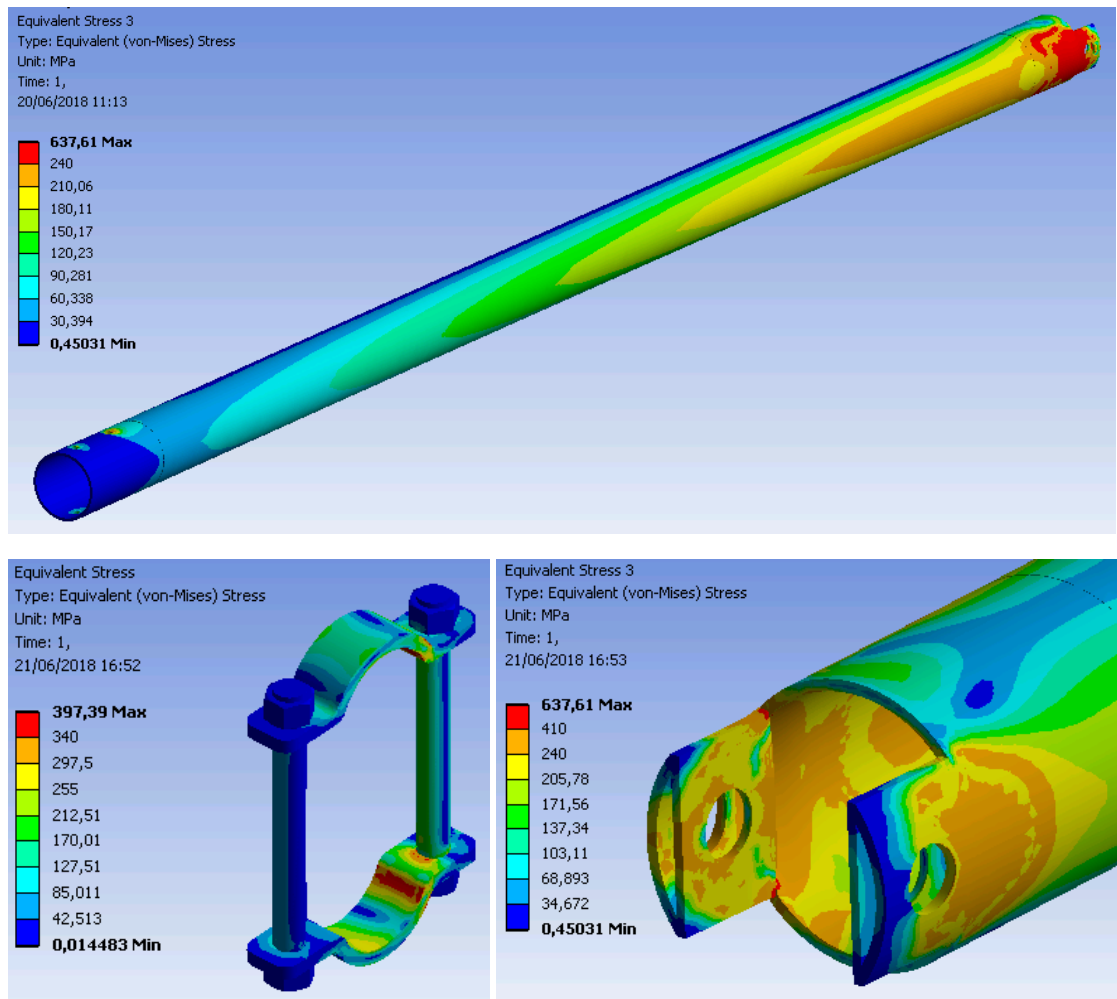


Figura 142. Tensiones de Von Mises resultantes en el poste Versión 2 a) modelo completo, b) detalle de abrazaderas y pernos de la cabeza y c) detalle de la base del poste.

Las abrazaderas, con límite elástico 340 MPa solo sufren plastificación en pequeñas zonas que coinciden con las de aplicación de la carga. La tensión máxima alcanzada es de 392 MPa, muy inferior a su carga de rotura. Los pernos se seleccionan de calidad 5.8 para evitar que superen el límite elástico (de 400 MPa). El tronco del poste no sufre ninguna tensión relevante, siempre inferior al límite elástico. Al llegar a la base se ve que existe una importante plastificación. Incluso existen 2 puntos coincidentes con el encuentro de las placas cuadradas perforadas con el poste circular, donde se supera el límite de rotura del material. Sin embargo, no se cree que estas tensiones puedan llegar a producirse en la realidad puesto que las soldaduras en esa zona añadirán material distribuyendo las tensiones sobre un área mayor. Además, las condiciones de contorno en los orificios resultan mucho más restrictivas que en la realidad, puesto que en el segundo caso siempre existirá una holgura entre el perno de conexión placa-poste y los orificios del poste que permitirá un mayor movimiento y contribuirá igualmente a aliviar tensiones en esa zona.

6.2.3 Versión 3: Circular 2

Esta nueva versión está pensada para una distribución de los cables por la cabeza del poste similar a la versión anteriormente descrita. Los cambios frente al diseño anterior se basan fundamentalmente en la sustitución del sistema de sujeción mediante abrazaderas y 2 pernos por dos piezas que se sueldan en la parte superior e inferior y que permiten igualmente el guiado de los cables. Estas piezas soldadas están formadas por un tubo vertical y una chapa perpendicular al anterior. Para evitar la salida de los cables de estas guías se emplea un perno que va desde la chapa de la pieza superior hasta la de la pieza inferior atravesando el poste circular.

La malla de elementos finitos se realiza de forma similar a la versión 2 a lo largo del perfil tubular principal y la base. Los tubos soldados y las chapas situados en la cabeza del poste tendrán un tamaño de 5 mm. La aplicación de las cargas también es idéntica. Se aplica una carga de compresión en la dirección del poste de 68 kN en tubo de la guía superior y de 58,6 kN en el tubo de la guía inferior. Además, se le aplica un desplazamiento lateral de 0.2 m.

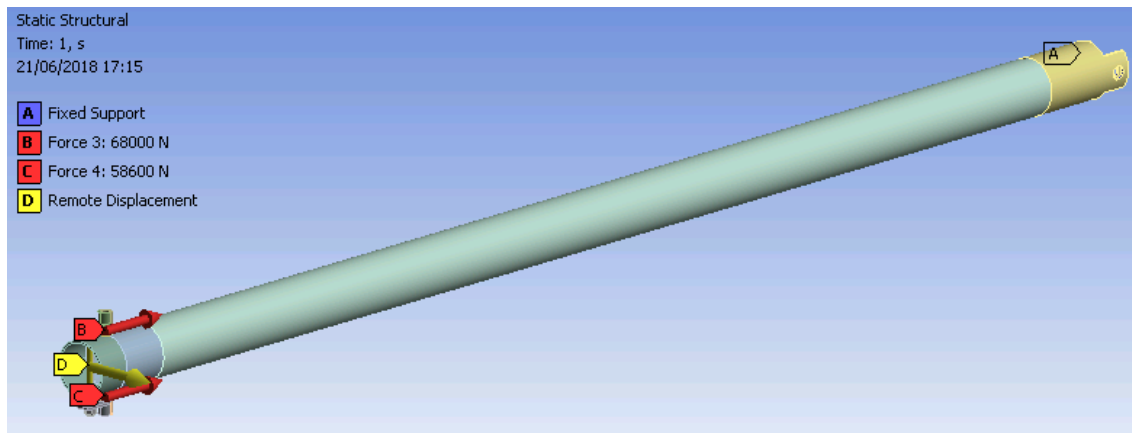


Figura 143. Geometría y cargas aplicadas al modelo numérico de poste Versión 2.

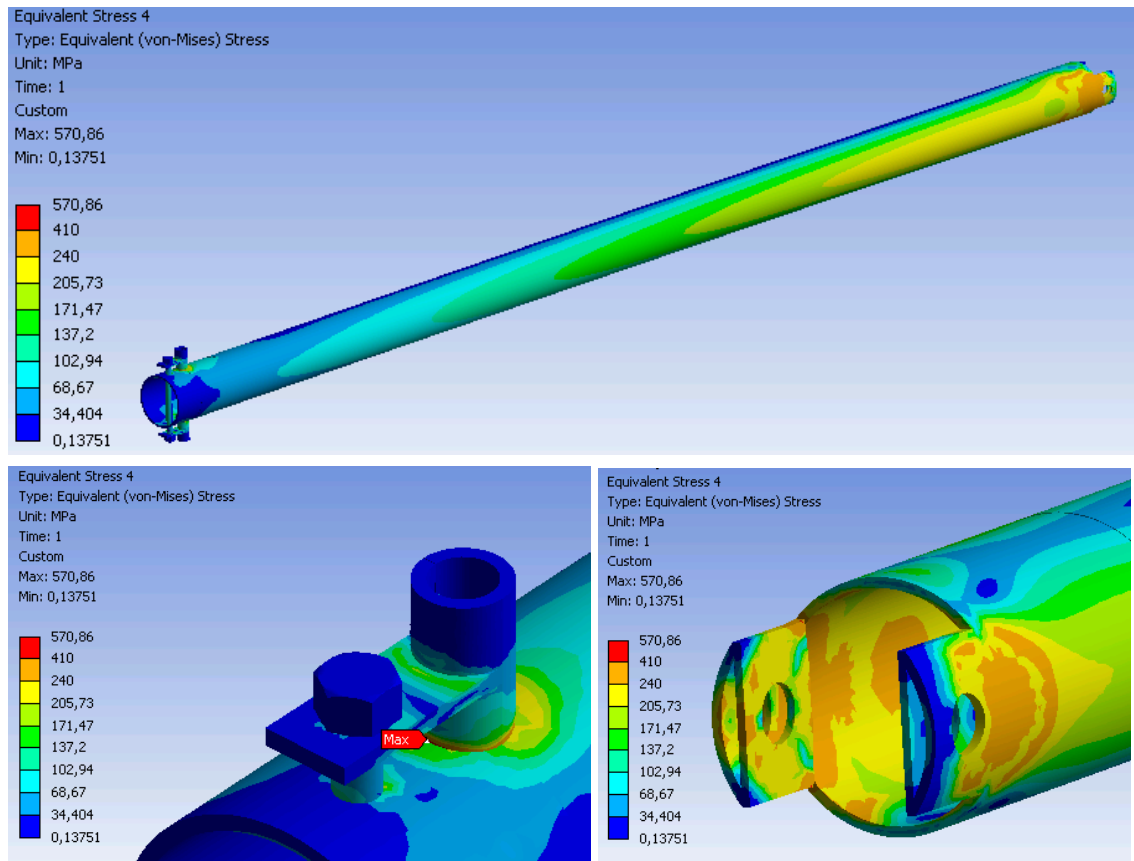


Figura 144. Tensiones de Von Mises resultantes en el poste Versión 3 a) modelo completo, b) detalle de la guía superior de la cabeza del poste, y c) detalle de la base del poste.

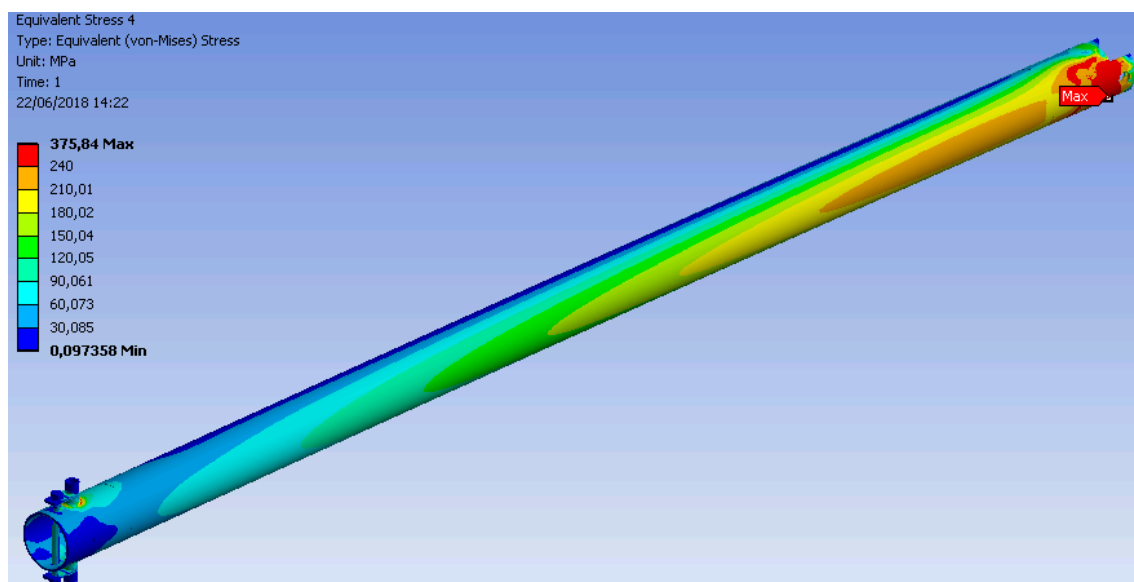


Figura 145. Tensiones de Von Mises resultantes en el poste Versión 3 tras el redondeo de las aristas problemáticas, tal y como ocurre en la aportación de material por la soldadura entre las dos piezas.

Las mayores tensiones aparecen en la intersección entre los tubos verticales y el tubo principal. Se crea un nuevo modelo redondeando dichas aristas y se recalcula, obteniendo tensiones de menor magnitud llegando a un máximo de 375 MPa, valor que aunque sigue estando dentro del rango plástico, es considerablemente menor que el del modelo anterior y no supera el límite de rotura del material.

6.3 Selección del diseño preliminar y modelización del definitivo

Una vez que obtenidas las simulaciones numéricas y comprobada la integridad estructural de los tres tipos de postes, es necesario tomar una decisión y seleccionar uno de los tres para su incorporación al diseño de pantalla final. Esta decisión se ha tomado fundamentalmente en base a 3 criterios: la minimización de peso, el comportamiento debido a la inercia y la presencia (o más bien ausencia) de aristas vivas y puntos críticos que provoquen la rotura de los cables. La primera versión de poste, con perfil HEB140 en sus 2 orientaciones, supone 33,7 kg/m frente a los 28,23 kg/m del perfil circular empleado en los postes de tipo 2 y 3. Adicionalmente, hay que recordar que los perfiles circulares ofrecen idénticos momentos de inercia en los dos ejes perpendiculares. Esto también proporciona una ventaja respecto a los perfiles HEB puesto que los postes extremos suelen sufrir una carga en dirección horizontal provocada por la fijación de la malla, y los postes intermedios flexión debido a la carga en la punta. Con este razonamiento se decide descartar la versión HEB, quedando las versiones de perfil circular. Entre estas dos se observa que la guía de la cabeza del poste es menos agresiva con el cable perimetral en la versión 3, puesto que se han utilizado tubos metálicos soldados y por tanto no existen aristas vivas con las que el cable pueda rozar.

Una vez seleccionado el diseño entre las tres propuestas iniciales y visto la reducida área de deformación plástica, se decide aligerar el diseño para facilitar la labor de instalación a los operarios. Así, se realiza un nuevo modelo con un tubo de diámetro exterior 114,3 mm y espesor 8 mm, cuya masa es de 22,31 kg/m, un 21 % inferior al anteriormente empleado. Adicionalmente, para prevenir interacciones entre el cable que abraza el poste procedente del viento superior y el cable perimetral que se desliza por la guía superior, se decide modificar ligeramente el método de sujeción del viento superior. Se elimina la guía inferior y se sustituye por dos tubos soldados a ambos laterales del poste, ligeramente atrasados respecto a la guía superior a una distancia de 20 cm. El modelo de elementos se realiza redondeando aristas de los elementos soldados.

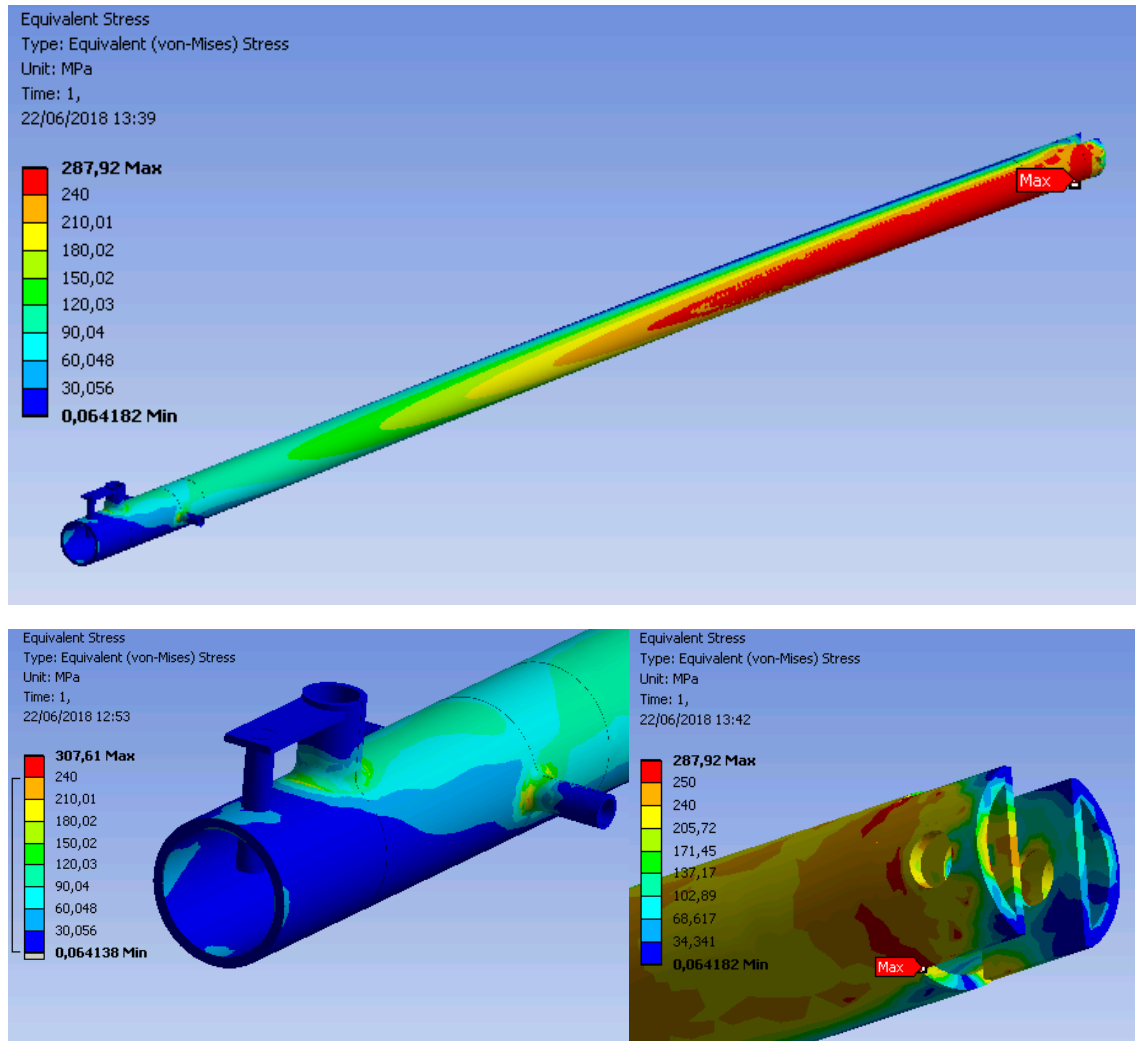


Figura 146. Tensiones de Von Mises resultantes en el poste definitivo a) modelo completo, b) detalle de las guías de la cabeza del poste para el cable perimetral y viento superior, y c) detalle de la base del poste.

Aunque el área de tensión plástica es mayor en este modelo respecto a los anteriores, la plastificación es muy reducida y desaparece en prácticamente toda la longitud del poste a una tensión de 250 MPa, quedando únicamente en la base del poste zonas muy pequeñas, y no superando los 287 MPa, valor muy inferior al de rotura del material.

7 Diseño de las placas de anclaje

Las placas de anclaje reciben las cargas procedentes tanto de los postes como del cable perimetral más cercano y los transmiten al terreno. Por tanto, deben tener 2 partes principales. La primera de ellas será la zona de sujeción del poste. Para permitir el giro de este deberá de disponer de uno o varios orificios para el paso de un bulón que ejercerá de eje de giro. La segunda parte deberá guiar el cable perimetral, por lo que deberá cumplir los mismos requisitos que la guía ubicada en la cabeza del poste, esto es, evitar aristas vivas y fácil instalación e intercambio.

7.1 Cargas consideradas

Siguiendo el mismo procedimiento que el empleado en los postes, se extraen los valores de fuerzas generadas por los cables y los ángulos que estas forman con los ejes en la base del poste. Las componentes x, y y z que resultan son:

- **Componente x**: no se anula, ya que se da la circunstancia de que en el instante de máxima flecha todavía está el cable deslizándose. Por tanto, los modelos de elementos finitos implementados habrán de incluir una carga lateral de valor 22,7 kN.
- **Componente y**: La componente vertical y hacia abajo de los cables perimetrales es de 122,7 kN.
- **Componente z**: $30+31,3= 61,3$ kN en sentido positivo del eje z.

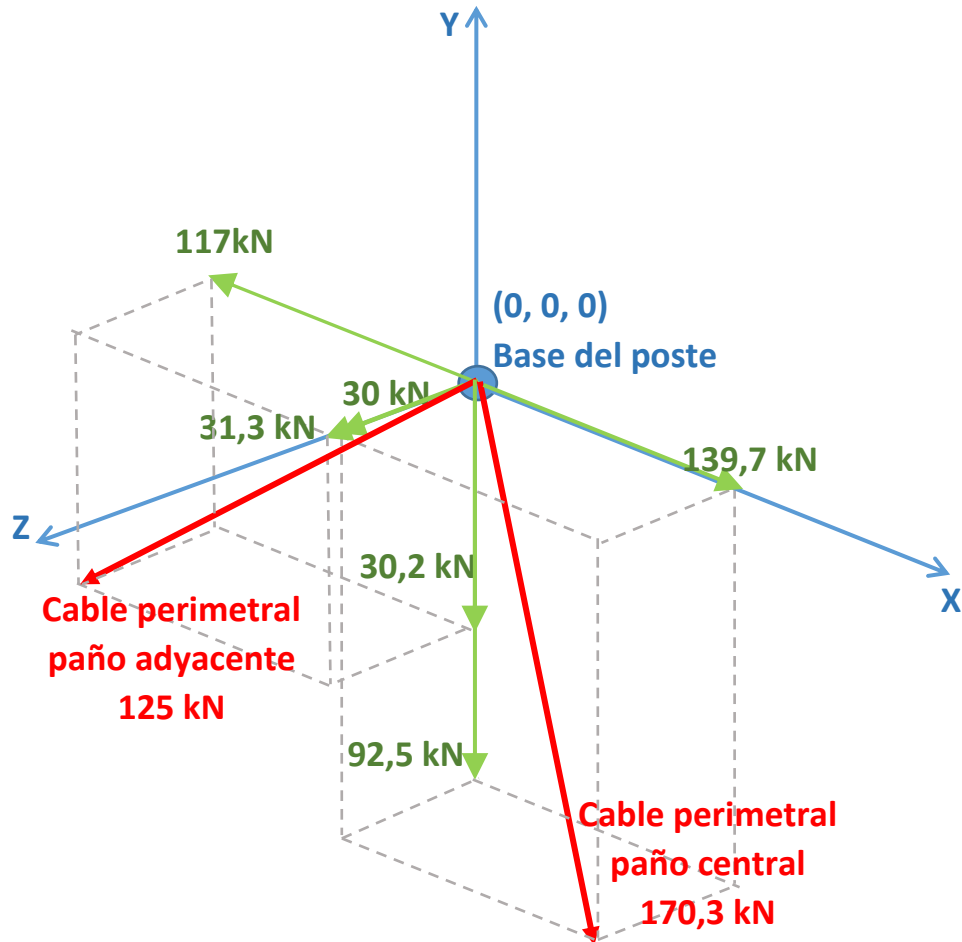


Figura 147. Esquema de la disposición de las cargas consideradas en la base del poste en el instante de equilibrio del modelo de pantalla completa.

7.2 Diseños considerados

Se realizan 3 diseños de placa de anclaje basados en la sencillez y facilidad de instalación de los cables perimetrales.

7.2.1 Versión 1

La primera propuesta de placa de anclaje consiste en la utilización de dos chapas verticales de 20 mm de espesor con dos orificios cada una, en las que se insertan dos pernos. El perno superior corresponde a la sujeción del poste con la placa, y en el perno inferior se coloca un grillete, que será el encargado del guiado del cable perimetral en este punto. La placa base tiene un espesor de 20 mm.

En cuanto a las condiciones de contorno introducidas, se colocan apoyos fijos en ambos orificios donde se colocarán las barras Gewi de sujeción al terreno. Se elimina el grillete ubicado en el perno inferior, y las cargas se introducen sobre un filete central de dicho perno, con un valor de 120 kN en dirección vertical hacia abajo y de 60 kN en horizontal. Sobre el perno superior, sobre el que irá colocado el poste, se aplica una carga horizontal de 124 kN.

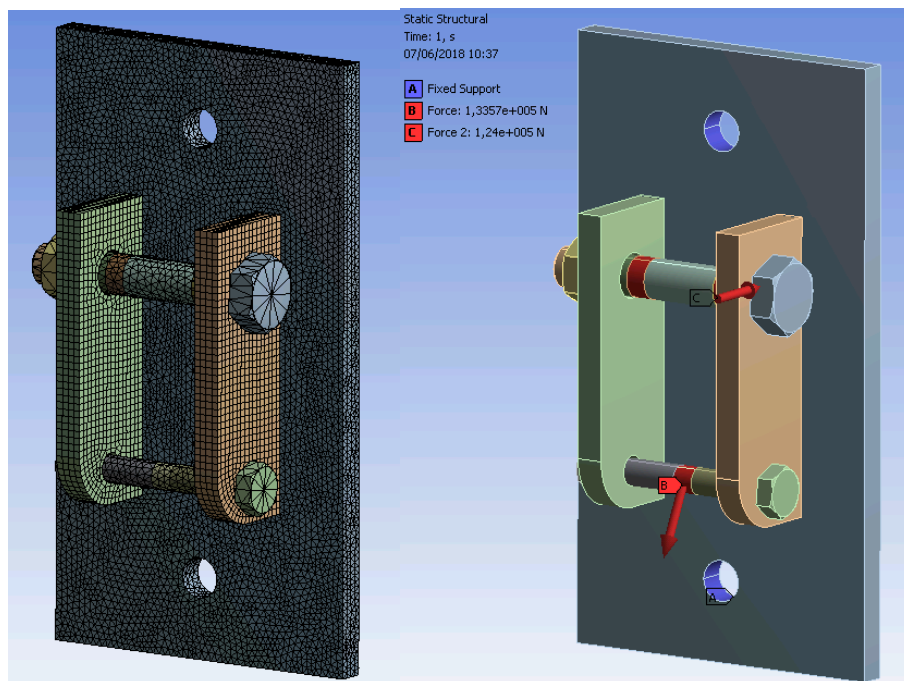


Figura 148. Malla y condiciones de contorno de la placa de anclaje Versión 1.

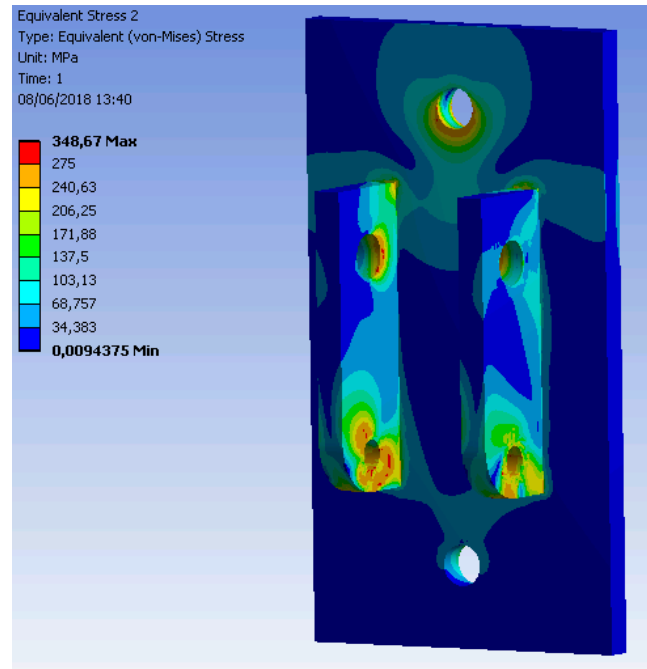


Figura 149. Tensión de Von Mises de la placa de anclaje Versión 1.

El grillete es de tipo lira de alta resistencia, de medida nominal 5/8". Estos tienen una carga de trabajo de 3250 kg=31 kN, con un factor de seguridad de 6. Esto significa que la rotura se produce a 6 veces la carga dada; es decir, a 186 kN, valor superior a los 133 kN aplicados; por lo tanto, el grillete no fallará.

7.2.2 Versión 2

La segunda propuesta de placa de anclaje se sigue basando, como en el caso anterior, en el guiado del cable perimetral a través de un grillete (Figura 150). La placa base tiene unas dimensiones de 250x400x20 mm. Esta vez, el grillete de guiado va enlazado a otro grillete, que es el que se sujeta a la placa de anclaje, que está formada por dos chapas verticales de 20 mm de espesor, separadas una distancia de 115 mm entre caras interiores para que pueda caber el poste entre ellas. El orificio superior de la chapa más larga y el único orificio de la chapa más corta sirven para hacer pasar un perno cuyo objetivo es fijar los desplazamientos del poste y las rotaciones en 2 direcciones. Por otra parte, la chapa más larga, cuya esquina inferior se encuentra redondeada, posee otro orificio para la sujeción del grillete de enlace.

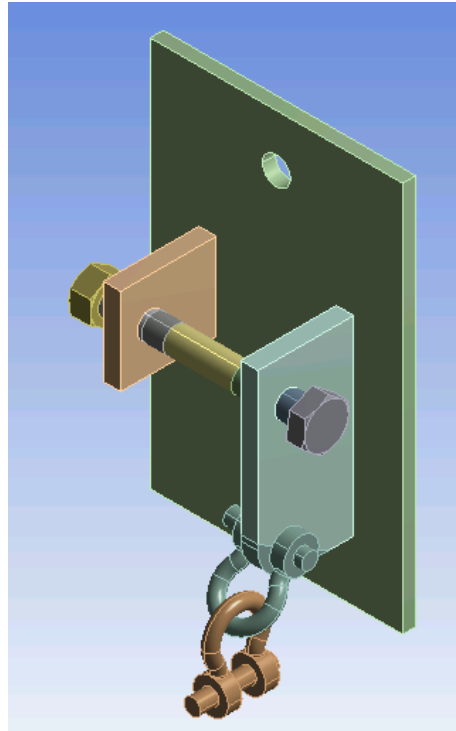


Figura 150. Geometría de la placa de anclaje Versión 2.

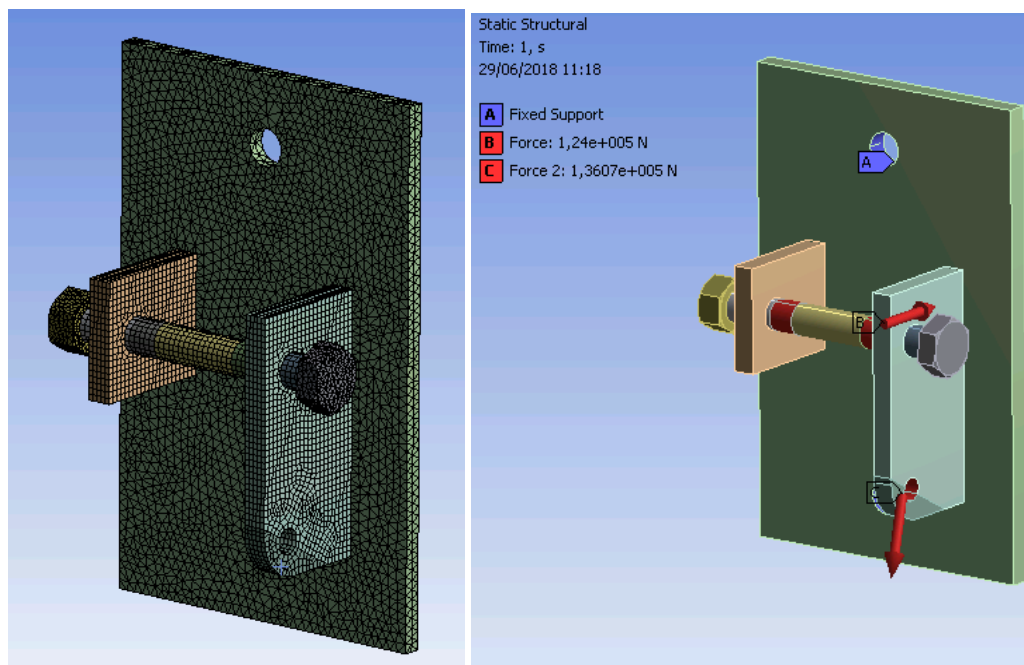


Figura 151. Malla y condiciones de contorno de la placa de anclaje Versión 2.

En cuanto a las condiciones de contorno, estas se introducen de forma similar al anterior modelo. Se definen apoyos fijos en ambos orificios donde se colocarán las barras Gewi de sujeción al terreno. Se eliminan los grilletes y las cargas se introducen sobre el orificio de la placa a la que se conectan, con un valor de de 120 kN en dirección vertical hacia abajo y de 60 kN en horizontal. Por último, sobre el perno de conexión con el poste, se aplica una carga horizontal de 124 kN al igual que en el anterior modelo.

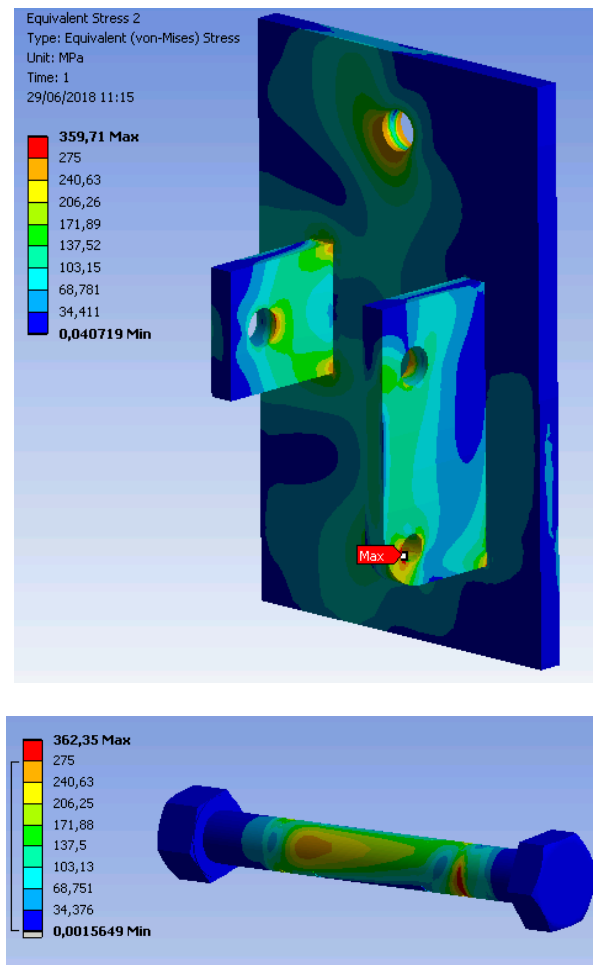


Figura 152. Tensión de Von Misses de la placa de anclaje Versión 2 y en el bulón de conexión con el poste.

Estas dos primeras versiones presentadas son las más sencillas en cuanto a su fabricación. Sin embargo, presentan dos inconvenientes. El primero de ellos es que los grilletes, necesarios para realizar el guiado del cable perimetral y que se pensaron como una ventaja por su sencillez de colocación, ofrecen al mismo una gran movilidad e inestabilidad a dicho cable, al mismo tiempo que se trata de un componente no del todo seguro, pues puede ser sustraído de estructuras situadas en zonas fácilmente accesibles al ser humano. El otro inconveniente se relaciona también con la interacción de los grilletes con otros componentes, y es que estos podrían impactar

incontroladamente contra el bulón inferior de fijación de la placa de anclaje, provocando situaciones no planeadas como el atascamiento del cable perimetral, la rotura del grillete o la modificación de la trayectoria del cable perimetral.

Por ello, se buscaron alternativas a estos modelos en las que el método de guiado del cable perimetral fuese más fijo, pero que a su vez mantuviese la sencillez en caso de sustitución del cable perimetral y la libertad de deslizamiento del mismo. Resultado de dicha búsqueda se planteó la versión 3 que se describe a continuación, y que será la que se emplee en el diseño final de la pantalla dinámica.

7.2.3 Versión 3

La última propuesta analizada consiste en la utilización de dos chapas plegadas en forma de U soldadas a la placa base de forma que la ubicada en la parte superior tiene la parte abierta hacia arriba, y la inferior tiene la parte abierta hacia abajo. La U superior tiene 2 orificios en las aletas verticales, con el fin de colocar el perno que sujeta el poste a la placa. La parte horizontal de ambas chapas en U se atraviesan por un perno. Será detrás de dicho perno por donde pase el cable perimetral.

En un inicio se plantean 2 opciones: que la base del poste se conecte a la placa mediante el perno por la parte exterior de la placa plegada o que el poste se conecte por el interior de dicha placa. Debido al diseño último del poste, en el que se emplea un perfil tubular de diámetro exterior 114,3 mm, se descarta la primera opción, puesto que en caso contrario las dos aletas verticales de la placa plegada superior apenas dejarían espacio para introducir el perno vertical, fundamentalmente debido a la mayor anchura de la cabeza del mismo.

La placa base se fabrica de acero A42-27ES de 20 mm de espesor. La chapa plegada superior tiene 15 mm de espesor, la inferior 10 mm y se empleará el mismo material que para la placa.

Las cargas se aplican en 2 direcciones: una carga horizontal de 122 kN en un filete de la U inferior, y una carga horizontal de 61,3 kN en un filete del perno vertical. Además, en el perno de sujeción del poste se aplica una carga horizontal de 124 kN (procedente del poste).

Los coeficientes de rozamiento serán entre los pernos y los orificios de la placa son en todos los casos de 0,2, valor comúnmente utilizado en interacciones acero-acero.

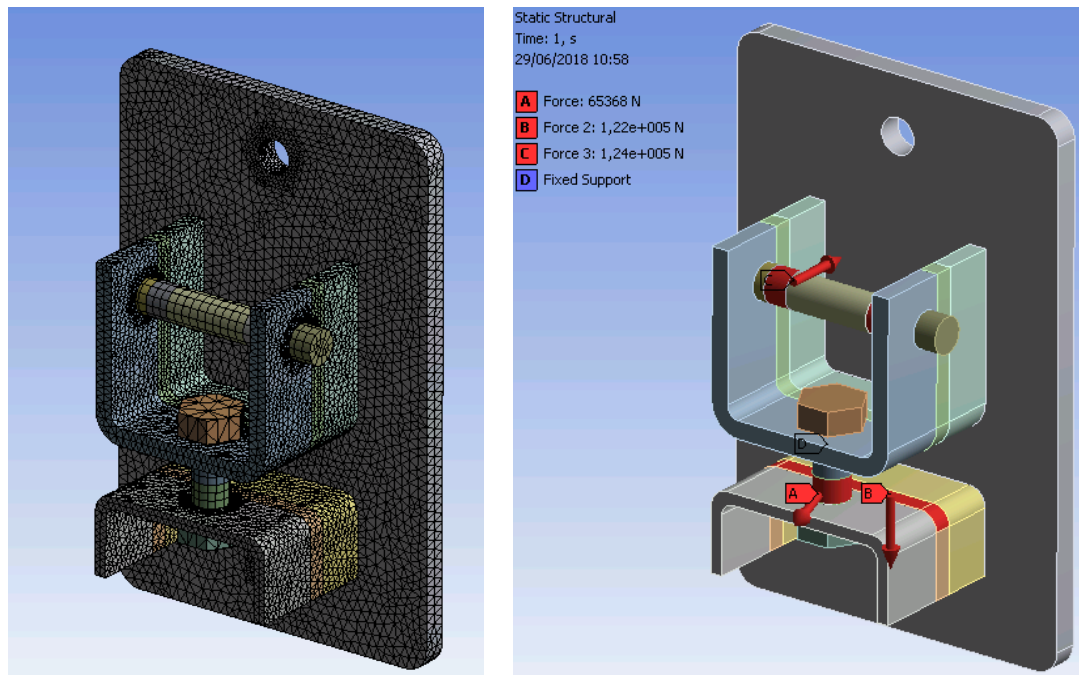


Figura 153. Malla y condiciones de contorno de la placa de anclaje Versión 3.

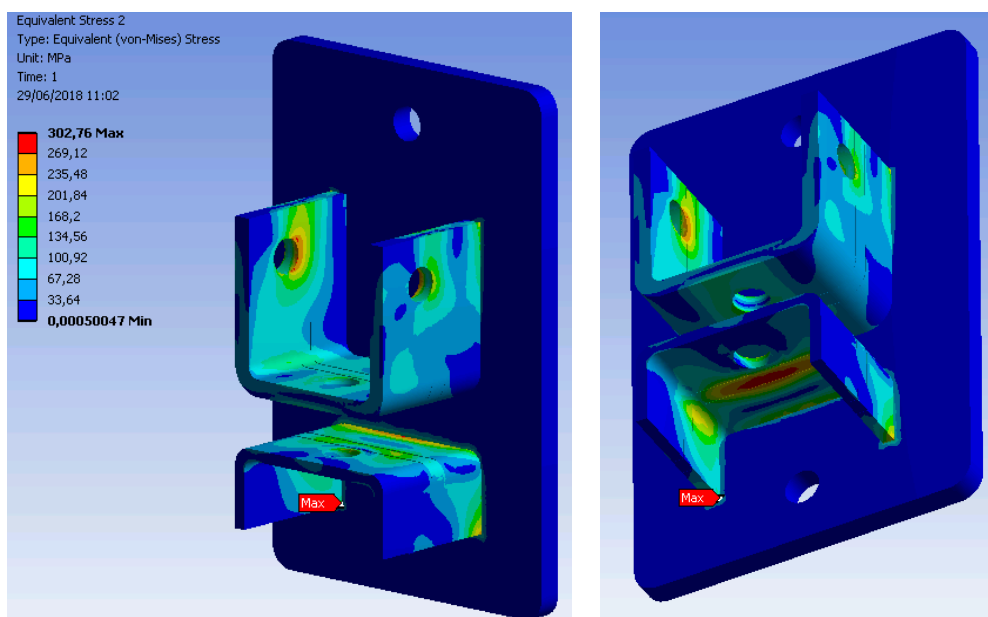


Figura 154. Tensión de Von Misses de la placa de anclaje Versión 3.

Las tensiones obtenidas en esta placa de anclaje superan el límite elástico únicamente en puntos aislados de los bordes del perno horizontal y en la parte inferior de la placa plegada inferior, pero no supera en ningún caso la tensión de rotura del material.

8 Corroboración experimental de los modelos

8.1 Introducción

Una vez que se ha decidido el tamaño de la pantalla mediante el diseño de experimentos (DOE) de la sección anterior en conjunción con las limitaciones operacionales y de montaje, se deben realizar ensayos experimentales para corroborar la verosimilitud y viabilidad del modelo seleccionado.

Los ensayos se realizan siguiendo la normativa ETAG 027. Por tanto, se llevan a cabo 3 impactos a dos niveles de energía diferentes, tal y como se procedió en los ensayos de las pantallas que han servido de calibración y punto de inicio para este proyecto. El nivel de energía de servicio (SEL) será de un tercio del valor de energía máxima (MEL).

Aunque la energía máxima obtenida en las simulaciones para el tipo de pantalla seleccionada es de 513 kJ según la simulación numérica y 520 kJ según el análisis DoE, se decide realizar un primer ensayo aplicando un factor de seguridad al mismo con el objetivo de asegurar la certificación para su comercialización en, al menos, un nivel de energía.

Se realizan ensayos por tanto a 2 pantallas empleando diferentes niveles de energía. La primera de ellas se ensayó a una energía máxima de 250 kJ, y ya en segundo lugar se realizó un ensayo de la misma pantalla (a la que se le podrán realizar ligeras modificaciones teniendo en cuenta los resultados de la anterior) a un nivel de energía máximo de 500 kJ.

Los ensayos se realizaron en una cantera en desuso en la localidad de Valles, en el Municipio de Reocín (Cantabria). Este emplazamiento ya fue utilizado con el mismo fin en 2015, cuando la empresa MTC realizó sus ensayos de certificación de su producto IBT-500.

En este documento se describen paralelamente ambas pantallas, los ensayos y los resultados por el paralelismo entre los procedimientos para ambas.

8.2 Descripción de las pantallas

Las pantallas constan de 3 paños de 10 metros de largo y 4 m de ancho. La malla de alambre MT15000 se mantienen erguida gracias a cuatro postes de perfil circular (descritos y calculados en el apartado 6.3, Figura 146) Los postes se unen a las placas de anclaje mediante un pasador.



Figura 155. Imagen del poste y su placa de anclaje

Las placas de anclaje (descritas y calculada en el capítulo anterior), se anclan al terreno mediante barras Gewi de 25 mm de diámetro nominal. El acero tiene un límite elástico de 500 MPa y un límite de rotura de 550 MPa. Cada placa de anclaje va sujeta con 2 bulones, uno en la parte superior y otro en la inferior. Se decide que las placas de anclaje irán ubicadas en la misma localización que en los ensayos hechos anteriormente por MTC en 2015 para la certificación de una de sus pantallas, puesto que el tamaño de los paños es el mismo. El inconveniente está en que las placas de anclaje utilizadas por MTC se anclaban al terreno mediante tres bulones en cada placa, dos arriba y uno abajo. Se toma la determinación de aprovechar el bulón inferior, y realizar una perforación entre los dos bulones superiores ya existentes. Esto fue posible realizarlo en tres de los anclajes de las placas, contando de izquierda a derecha el primero, segundo y cuarto. En el tercer anclaje no fue posible la perforación intermedia con la barra GEWI ya que las perforaciones existentes se encontraban torcidas en el interior del terreno. Para colocar la placa de anclaje se realizan dos orificios adicionales en la misma que serán atravesados por los bulones del anterior ensayo. Se les coloca la tuerca, pero no se les da ningún tipo de apriete. Con ello, los únicos bulones que realmente anclan la placa al terreno, y al que se les da cierto apriete a las tuercas, son el superior central (que se ha realizado nuevo para este ensayo) y el inferior (ya existente).

La malla MT15000 se sujeta a los cables perimetrales mediante otro cable de cosido, de menor diámetro. El hecho de que la retícula de la malla sea tan pequeña hace imposible el cosido de cada una de las espiras al cable perimetral con cables de diámetro 10 u 8 mm, que son los que

comúnmente se usan para este fin. La solución adoptada, que ya se describió en apartados anteriores de la tesis, pasa por la colocación de un cable premontado de diámetro 10 mm en cada lateral de la red de cables. Mientras que en la simulación numérica el cosido se realiza añadiendo anillas metálicas rígidas cada 3 retículas, en la realidad se tendrá un cable continuo que es el que realizará el cosido pasando cada 3 retículas. Gracias al cable premontado, la carga se distribuirá de forma más uniforme al resto de las espiras del contorno.

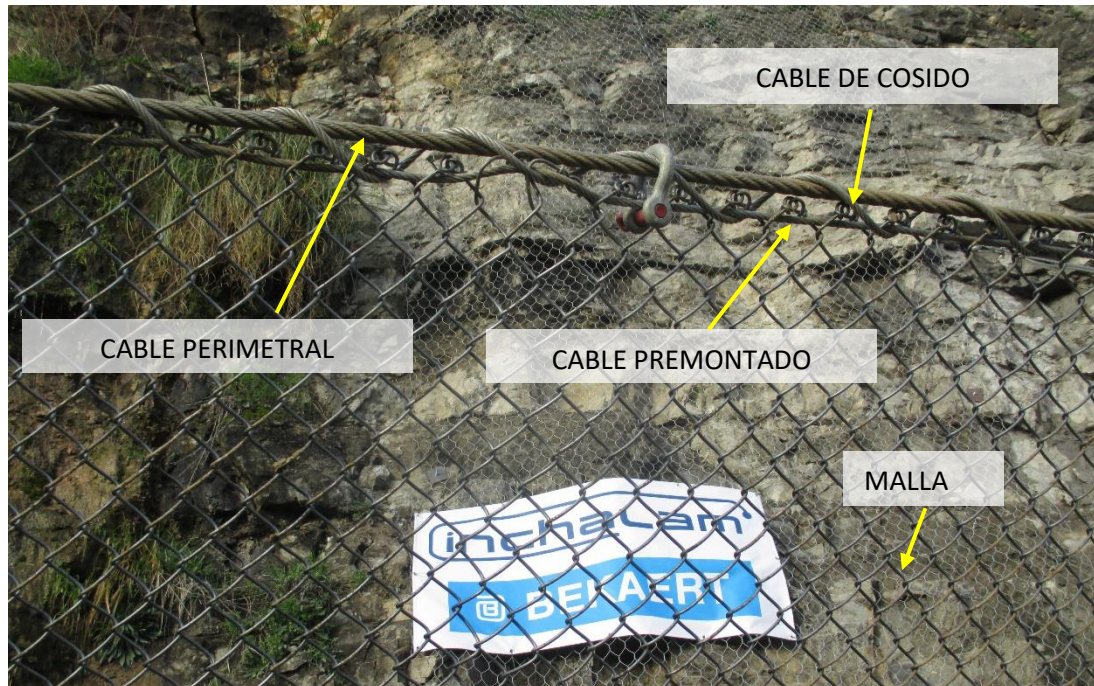


Figura 156. Malla MT15000, cable perimetral, cable premontado y cable de cosido.

Tal y como se simuló numéricamente, esta pantalla solo dispondrá de un viento superior por poste, y en cada uno de los vientos superiores y vientos laterales se colocará un dissipador de energía de 6 tubos. Está previsto que este dissipador de energía sea capaz de disipar 62 kJ según las estimaciones a partir de las curvas experimentales obtenidas en el apartado 4.6 y extrapolando a un modelo de 6 tubos.

A todos los frenos se les ha colocado un cable de seguridad, que evitará que, en caso de rotura del freno, aparezca una discontinuidad en el cable perimetral o cables superiores donde los frenos van colocados (Figura 23).



Figura 157. Imagen de un freno en un viento superior.

Tanto los vientos superiores como los cables perimetrales, finalmente se anclan al terreno mediante anclajes perforados en la roca. Los anclajes son de cable con una profundidad de entre 2 y 3 metros.



Figura 158. Detalles de los anclajes y los frenos.

Las pantallas se colocaron en posición aproximadamente horizontal, con un ángulo entre 8 y 10 grados, sobre un parámetro vertical de la cantera. La pantalla se encontraba a unos 9 metros del suelo, distancia suficiente para que pudiera deformarse sin que el bloque tocara el suelo.

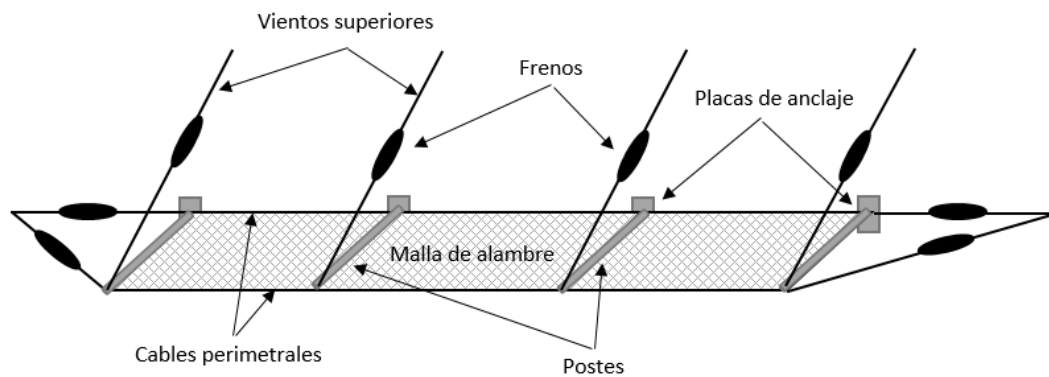


Figura 159. Esquema en el que se indican todos los componentes de la pantalla.

Tal y como se definió en las simulaciones numéricas y se estableció posteriormente al análisis DoE, se dejará sin coser alrededor de un metro a cada lado de la cabeza de los postes intermedios. El cable de cosido no es independiente para cada paño, sino que mantiene su continuidad a lo largo de los tres paños de la pantalla. Debido a que el cosido de todo un lateral de la pantalla con un solo cable se haría muy tedioso para los operarios debido a su gran longitud que habría que hacer pasar por multitud de huecos, se utilizan varios cables de menor longitud que se unen mediante pequeños sujetacables para asegurar su continuidad. Para evitar una excesiva tensión en el cable de cosido se decide dejar una holgura en la zona sin coser, formando una catenaria de altura 0,4 m en el caso de la pantalla de 250 kJ y de 0,8 m en la de 500 kJ (Figura 160b).



Figura 160. Detalle de la cabeza del poste donde se aprecia a) guiado del cable perimetral y sujeción de vientos superiores, y b) la zona sin coser en las inmediaciones del poste y cable de cosido

La unión de la malla MT15000 con los postes extremos también tuvo que ser estudiado previamente a su instalación. El sistema que se decide emplear pasa por la instalación un cable

premontado en el lateral de la malla, de la misma manera que el cable premontado del lateral largo que recorre los 3 paños. Ese cable premontado permitirá el cosido de la malla a los postes extremos haciendo pasar el cable de cosido cada 3 retículas, y asegurando así todo el contorno de la malla tal y como se muestra en la Figura 161.



Figura 161. Vista lateral del cosido de la malla MT15000 al poste del extremo izquierdo

El croquis de montaje y fijación de cada uno de los cables premontados y de cosido se muestra en la Figura 162.

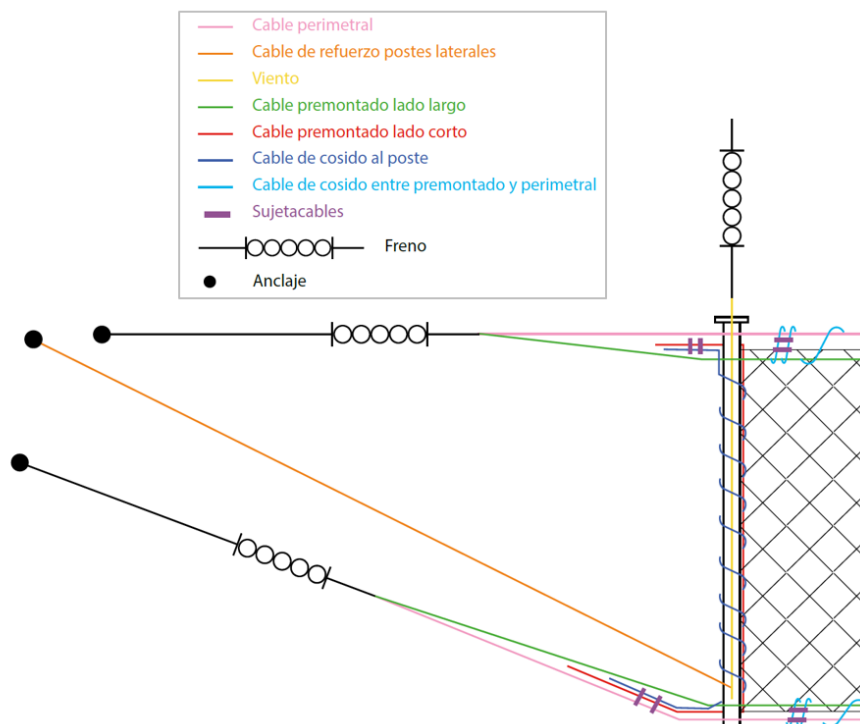


Figura 162. Esquema de montaje y fijación de los cables

Para ensayar ambas pantallas ha sido necesario instalar una pieza auxiliar (Figura 163) en uno de los postes que asegure la alineación del cable perimetral inferior puesto que la roca en esa zona se encuentra ligeramente erosionada hacia el interior. Esta pieza auxiliar se ancla a la roca mediante bulones y mediante dos cables verticales y permite que la placa de anclaje del poste centra izquierdo se posicione a la misma altura que el resto de placas y por tanto no exista un ángulo en el cable perimetral que enturbie los resultados.



Figura 163. Pieza auxiliar del poste central izquierdo.

Solo existen 2 diferencias entre la pantalla ensayada a 250 kJ y la ensayada a 500 kJ.

En primer lugar, mientras que para la pantalla de 250 kJ los cables perimetrales son de 16 mm de diámetro, para la pantalla de 500 kJ se decide sustituir estos por unos de diámetro 20 mm. En apartados siguientes se detallará el por qué de este cambio. En segundo lugar, la fijación del cable de cosido para la pantalla de 250 kJ se realiza uniéndolo directamente con el cable perimetral utilizando dos sujetacables (Figura 164 a). Sin embargo, se cree más conveniente, tras el primer ensayo, que la mejor solución para reducir el daño de la malla en las esquinas es unir el cable consigo mismo tal y como se muestra en la Figura 164 b.

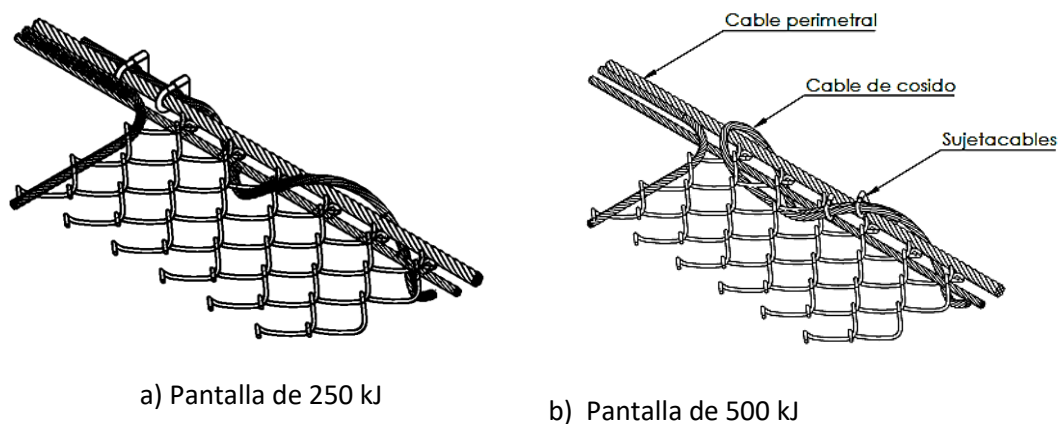


Figura 164. Fijación del cable de cosido a) en la pantalla de 250 kJ y b) en la pantalla de 500 kJ.

8.3 Instrumentación

8.3.1 Pantalla de 250 kJ

Se instalaron un total de 20 sensores para determinar las fuerzas en los cables perimetrales, tirantes, cables de la propia red y cimentaciones (bulones).

- 10 células de carga para cable de 16 mm, que se han ubicado en los vientos superiores, vientos laterales y cables perimetrales.
- 2 galgas extensométricas para la medida de tensión en un bulón. Se ha seleccionado el bulón superior derecho de entre los 3 posibles bulones, ya que se considera que es el que sufre mayores cargas. La posición de la galgas es en la parte superior y en la parte inferior del bulón.
- 8 galgas extensométricas, conectadas a 4 canales independientes, para la medida de tensión en los alambres de la malla MT15000. Se han seleccionado 4 puntos del paño

central que están separados de la base del poste o en su caso, de la cabeza del poste un metro en cada una de las 2 direcciones.

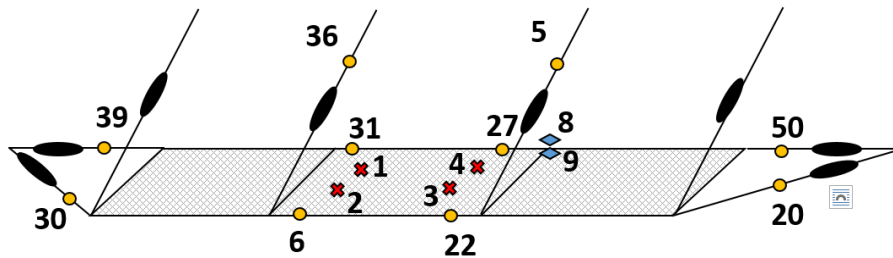


Figura 165. Esquema de montaje de los sensores en la pantalla de 250 kJ. Los puntos amarillos representan sensores de cable, las cruces rojas galgas extensométricas en la malla y los rombos azules, galgas extensométricas en un bulón.

8.3.2 Pantalla de 500 kJ

Se instalaron un total de 15 sensores para determinar las fuerzas en los cables perimetrales, tirantes, alambres de la malla y cimentaciones (bulones).

- 2 células de carga para cable de 16 mm, que se han ubicado en los vientos superiores.
- 7 células de carga para cable de 20 mm, que se han ubicado en los cables perimentrales y vientos laterales.
- 2 galgas extensométricas para la medida de tensión en un bulón. Se ha seleccionado el bulón superior derecho de entre los 3 posibles bulones, ya que se considera que es el que sufre mayores cargas. La posición de la galgas es en la parte superior y en la parte inferior del bulón.
- 4 galgas extensométricas, conectadas a 2 canales independientes, para la medida de tensión en los alambres de la malla MT15000. Se han seleccionado 2 puntos del paño central derecho que están separados de la base del poste o en su caso, de la cabeza del poste un metro en cada una de las 2 direcciones.

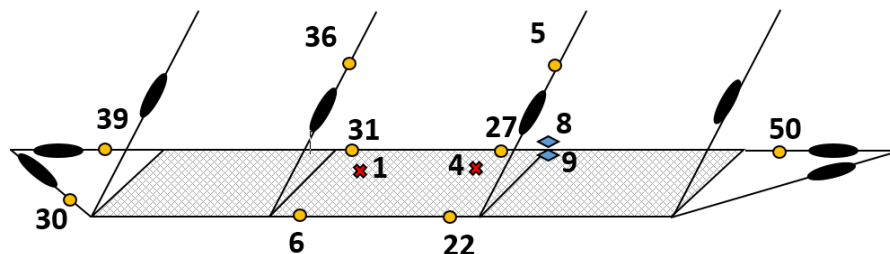


Figura 166. Esquema de montaje de los sensores en la pantalla de 500 kJ. Los puntos amarillos representan sensores de cable, las cruces rojas galgas extensométricas en la malla y los rombos azules, galgas extensométricas en un bulón.

8.4 Lanzamientos y bloques empleados

Los bloques tendrán la forma poliédrica indicada en la ETAG 027. Se crean 2 bloques distintos para cada una de las pantallas, uno para el ensayo SEL (2 impactos consecutivos) y otro para el ensayo MEL. Sus dimensiones se seleccionan de forma que la velocidad mínima del impacto sea de 25 m/s, condición establecida por la norma. Adicionalmente, habrá que asegurarse que la máxima longitud L_{ext} sea 3 veces más pequeña que la altura nominal de la pantalla (Tabla 38).

8.4.1 Pantalla de 250 kJ

Se realizaron un total de 4 lanzamientos. Los 3 primeros conforme a la norma ETAG 027 (SEL 1, SEL 2, MEL). En los 3 casos se lanzó un bloque a 37 m de altura. En los dos primeros lanzamientos se lanzó un bloque de 272 kg mientras que en el 3º el bloque pesaba 821,25 kg.

Una vez finalizado el ensayo según la ETAG 027 se realizó un lanzamiento adicional sobre el paño central a una altura aproximada de 45 m de alto con el bloque más grande, de 821,25 kg. El objetivo de este 4º impacto era, una vez finalizado el ensayo normalizado, comprobar si la pantalla era capaz de resistir un mayor nivel de energía (365 kJ) y localizar los puntos débiles de la estructura. En este documento solo se ofrecerán resultados de los sensores de los 3 primeros impactos, aunque se hará una revisión del comportamiento de la pantalla en el 4º impacto para ver su comportamiento y repercusiones.

8.4.2 Pantalla de 500 kJ

Se realizaron un total de 3 lanzamientos conforme a la norma ETAG 027 (SEL 1, SEL 2, MEL). En los 2 primeros casos se lanzó un bloque a 37 m de altura y en el último a 35,7 m. En los dos primeros lanzamientos se lanzó un bloque de 460,5 kg mientras que en el 3º el bloque pesaba 1429,5 kg.

Tabla 38. Propiedades de los bloques empleados en los ensayos experimentales de las pantallas de 250 kJ y 500 kJ.

| | | Masa del bloque (kg) | L_{ext} (m) | Velocidad (m/s) | Energía (kJ) |
|---------------|-----------|----------------------|---------------|-----------------|--------------|
| Ensayo 250 kJ | SEL 1 y 2 | 272 | 0,6 | 25 | 85,03 |
| | MEL | 821,25 | 0,8 | 25 | 256,73 |
| Ensayo 500 kJ | SEL 1 y 2 | 460,5 | 0,65 | 26,94 | 167,15 |
| | MEL | 1429,5 | 0,95 | 26,94 | 500 |

8.5 Resultados

8.5.1 Carga máxima en los cables

Los registros continuos de cada uno de los sensores se encuentran en el Anexo II. A continuación, se incluyen dos tablas únicamente con los registros máximos de cada uno de los sensores, así como la carga o deformación de rotura de los elementos en los que están colocados dichos sensores, facilitando así su interpretación.

Tabla 39. Registros máximos de fuerza en los sensores instalados en la pantalla de 250 kJ.

| SENSOR | TIPO | POSICIÓN | CARGA ROTURA | | MÁXIMO REGISTRADO SEL1 | | MÁXIMO REGISTRADO SEL2 | | MÁXIMO REGISTRADO MEL | |
|--------|--------------|-------------------------|--------------|----|------------------------|----|------------------------|----|-----------------------|----|
| N39 | Cable Ø16 mm | VIENTO LAT DETRÁS IZDA | 188 | kN | 76,1 | kN | 97,5 | kN | 98,2 | kN |
| N30 | Cable Ø16 mm | VIENTO LAT DELANTE IZDA | 188 | kN | 80,6 | kN | 79,2 | kN | 108,1 | kN |
| N36 | Cable Ø16 mm | VIENTO SUP IZDA | 188 | kN | 50 | kN | 40,2 | kN | 87,9 | kN |
| N31 | Cable Ø16 mm | PERIMETRAL DETRÁS IZDA | 188 | kN | 90,2 | kN | 117,8 | kN | 154,5 | kN |
| N6 | Cable Ø16 mm | PERIMETRA DELANTE IZDA | 188 | kN | 80,1 | kN | 102,6 | kN | 113,71 | kN |
| N22 | Cable Ø16 mm | PERMETRAL DELANTE DCHA | 188 | kN | - | kN | 102,4 | kN | 111,0 | kN |
| N27 | Cable Ø16 mm | PERIMETRAL DETRÁS DCHA | 188 | kN | 95,4 | kN | 114,4 | kN | 173,9 | kN |
| N5 | Cable Ø16 mm | VIENTO SUP DCHA | 188 | kN | 68,7 | kN | 48,8 | kN | 95,68 | kN |
| N50 | Cable Ø16 mm | VIENTO LAT DETRÁS DCHA | 188 | kN | 68,7 | kN | 73,3 | kN | - | kN |
| N20 | Cable Ø16 mm | VIENTO LAT DELANTE DCHA | 188 | kN | 76,9 | kN | 74,2 | kN | 97,4 | kN |
| N1 | GALGA | PAÑO DETRÁS IZDA | 7,4 | % | 0,0746 | % | 0,0994 | % | 0,1185 | % |
| N2 | GALGA | PAÑO DELANTE IZDA | 7,4 | % | - | % | - | % | - | % |
| N3 | GALGA | PAÑO DELANTE DCHA | 7,4 | % | 0,0586 | % | 0,0489 | % | 0,0467 | % |
| N4 | GALGA | PAÑO DETRÁS DCHA | 7,4 | % | - | % | - | % | - | % |
| N8 | GALGA | BULÓN PARTE SUPERIOR. | 16 | % | 0,0771 | % | 0,0862 | % | 0,0933 | % |
| N9 | GALGA | BULÓN PARTE INFERIOR | 16 | % | 0,1089 | % | 0,0974 | % | 0,1337 | % |

El sensor N22 no registró valores de carga durante el primer impacto SEL, pero sí lo hizo durante el segundo impacto SEL y en el impacto MEL. Esto pudo ser debido a una mala soldadura de los cables del sensor con el conector, que además se vio acentuada por la humedad del ambiente. Las

galgas N2 y N4 ubicadas en la malla de alambre no funcionaron correctamente. El sensor N50 tampoco registró datos durante el tercer impacto, correspondiente a la energía MEL.

Tabla 40. Registros máximos de fuerza en los sensores instalados en la pantalla de 500 kJ.

| SENSOR | TIPO | POSICIÓN | CARGA ROTURA | | MÁXIMO REGISTRADO SEL1 | | MÁXIMO REGISTRADO SEL2 | | MÁXIMO REGISTRADO MEL | |
|--------|--------------|-------------------------|--------------|----|------------------------|----|------------------------|----|-----------------------|----|
| N39 | CABLE Ø20 mm | VIENTO LAT DETRÁS IZDA | 325 | kN | 63,69 | kN | 136,79 | kN | 186,71 | kN |
| N30 | CABLE Ø20 mm | VIENTO LAT DELANTE IZDA | 325 | kN | 79,83 | kN | 94,70 | kN | 184,87 | kN |
| N36 | CABLE Ø16 mm | VIENTO SUP IZDA | 188 | kN | 65,29 | kN | 70,85 | kN | 160,12 | kN |
| N31 | CABLE Ø20 mm | PERIMETRAL DETRÁS IZDA | 325 | kN | 137,04 | kN | 216,14 | kN | 115,35 | kN |
| N6 | CABLE Ø20 mm | PERIMETRAL DELANTE IZDA | 325 | kN | 95,92 | kN | 128,69 | kN | 196,32 | kN |
| N22 | CABLE Ø20 mm | PERIMETRAL DELANTE DCHA | 325 | kN | - | kN | - | kN | - | kN |
| N27 | CABLE Ø20 mm | PERIMETRAL DETRÁS DCHA | 325 | kN | 124,21 | kN | 145,12 | kN | 162,76 | kN |
| N5 | CABLE Ø16 mm | VIENTO SUP DCHA | 188 | kN | 60,80 | kN | 98,76 | kN | 207,9 | kN |
| N50 | CABLE Ø20 mm | VIENTO LAT DETRÁS DCHA | 325 | kN | 47,03 | kN | 181,63 | kN | 263,60 | kN |
| N1 | GALGA | PAÑO DETRÁS IZDA | 7,4 | % | - | % | - | % | - | % |
| N4 | GALGA | PAÑO DETRÁS DCHA | 7,4 | % | 0,0395 | % | 0,0373 | % | 0,0600 | % |
| N8 | GALGA | BULÓN PARTE SUPERIOR. | 16 | % | 0,1025 | % | 0,1096 | % | 0,1637 | % |
| N9 | GALGA | BULÓN PARTE INFERIOR | 16 | % | 0,0781 | % | 0,0817 | % | 0,0985 | % |

El sensor de fuerza N22 no funcionó correctamente en ninguno de los 3 impactos, así como las galgas en la malla situadas en N1. El sensor N31 correspondiente al cable perimetral trasero en el lateral izquierdo resultó dañado a mitad de ensayo MEL. Por ello su bajo valor máximo (un valor de 115 kN), en comparación con el mismo cable en el lateral derecho del paño central (N50), donde se obtiene una carga de tracción de 263 kN.

El viento superior de la derecha (N5), sufre unas cargas de tracción de 208 kN, valor ligeramente superior a la carga de rotura del cable. Efectivamente se comprueba visualmente que dicho cable se rompe, quedando la pantalla pendiendo del cable de seguridad del freno.

8.5.2 Altura residual en la red

Sobre las pantallas se realizarán mediciones de ancho del paño (a), altura residual (h_r) y altura nominal inicial (h_N). El esquema de medición se puede ver en la Figura 167.

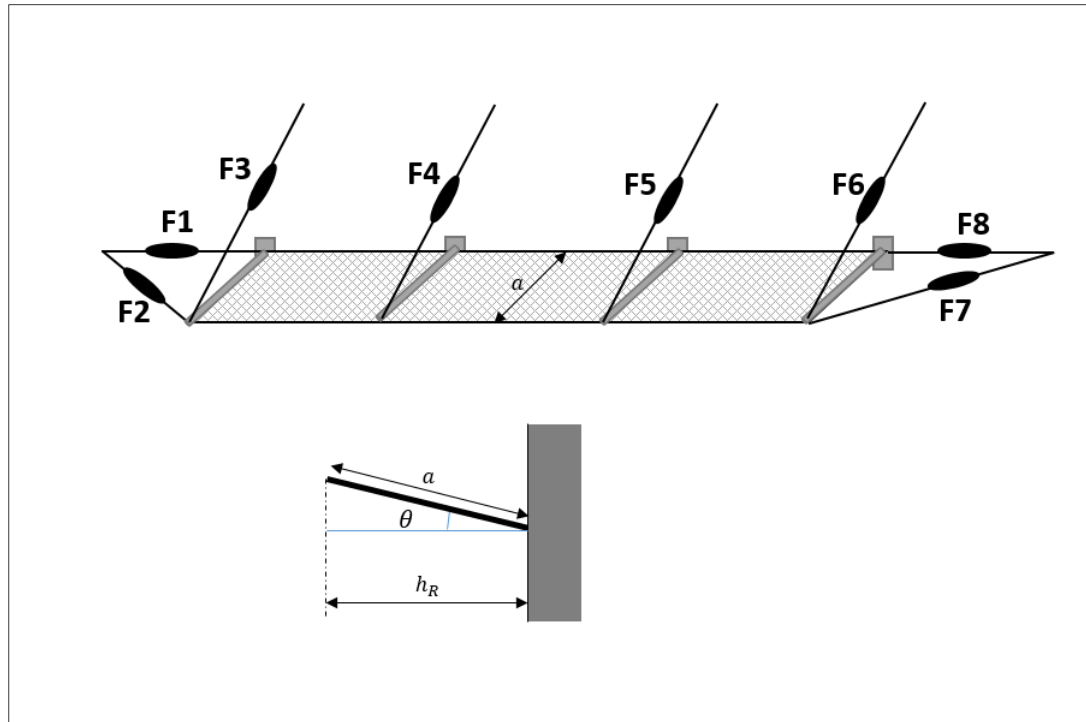


Figura 167. Altura residual. Esquema de medición.

8.5.2.1 Pantalla de 250 kJ

En la Tabla 41 se muestran las mediciones realizadas durante el ensayo para la determinación de la altura residual de la pantalla de 250 kJ. El ángulo que forma la distancia a con el plano horizontal se ha determinado mediante los fotogramas de la cámara de video de alta velocidad colocada en la vista de perfil.

La medición de altura residual se realiza antes de quitar el bloque de la pantalla. Sin embargo, debido a los rebotes que se produjeron en los ensayos SEL2 y MEL la altura residual en estos casos se midió sin el bloque en la malla.

Tabla 41. Altura residual en la pantalla de 250 kJ.

| INSTANTE | a (m) | θ (°) | h_R (m) | h_R / h_N | CRITERIO | CUMPLE? |
|---|-------|--------------|------------|-------------|----------|-------------|
| ANTES DE LANZAR | 3,70 | +8 | $h_N=3,66$ | | | |
| LANZAMIENTO 1 CON BLOQUE EN RED (SEL1) | 3 | +8 | 2,97 | 0,81 | >0,7 | SI |
| LANZAMIENTO 2 SIN BLOQUE EN RED (SEL 2) | 3,2 | +8 | 3,17 | 0,86 | >0,7 | SI |
| LANZAMIENTO 3 SIN BLOQUE EN RED (MEL) | 3 | +4 | 2,99 | 0,817 | >0,5 | Categoría A |

8.5.2.2 Pantalla de 500 kJ

En la Tabla 42 se muestran las mediciones realizadas durante el ensayo para la determinación de la altura residual de la pantalla de 500 kJ.

Tabla 42. Altura residual en la pantalla de 500 kJ.

| INSTANTE | a (m) | θ (°) | h_R (m) | h_R / h_N | CRITERIO | CUMPLE? |
|---|-------|--------------|------------|-------------|----------|-------------|
| ANTES DE LANZAR | 3,60 | 10 | $h_N=3,54$ | | | |
| LANZAMIENTO 1 CON BLOQUE EN RED (SEL1) | 2,70 | 8 | 2,67 | 0,754 | >0,7 | SI |
| LANZAMIENTO 2 CON BLOQUE EN RED (SEL 2) | 2,70 | 6 | 2,68 | 0,757 | >0,7 | SI |
| LANZAMIENTO 3 CON BLOQUE EN RED (MEL) | 2,44 | -7 | 2,42 | 0,684 | >0,5 | Categoría A |

8.5.3 Deformación máxima de la red

La máxima deformación de la red en la dirección del impacto, durante el impacto, constituye lo que denominamos elongación máxima. Se ha determinado a través de las grabaciones de las cámaras de alta velocidad.

Tabla 43. Elongación máxima en cada impacto.

| | Pantalla 250 kJ | Pantalla 500 kJ |
|-------------|-----------------|-----------------|
| LANZAMIENTO | Δy (m) | Δy (m) |
| 1º SEL 1 | 2 | 2,76 |
| 2º SEL 2 | 1,42 | 1,61 |
| 3º MEL | 2,10 | 2,62 |

8.5.4 Análisis visual

8.5.4.1 Pantalla de 250 kJ

Tanto en los dos impactos SEL como en el impacto MEL no se observaron roturas en ninguno de los componentes de la pantalla. Los bloques no atravesaron la pantalla y esta fue capaz de anular la energía cinética que llevaban los bloques en su trayectoria vertical hacia el suelo.

En los ensayos SEL2 y MEL los bloques rebotaron, llegando a alcanzar el suelo después de pasar por la parte superior de la pantalla en el caso del segundo SEL, y colándose entre la pantalla y la pared rocosa en el caso del ensayo MEL. Esto indica que la pantalla es muy elástica ya que la energía que provoca el impacto del bloque es transferida a la pantalla, y de nuevo al bloque posteriormente a alcanzar las cargas y flecha máximas. La desviación de la trayectoria vertical en su rebote puede ser debida a dos circunstancias: la primera es que el bloque no estuviese del todo centrado en el paño central en el momento del impacto, y la segunda es que el rebote estuviese condicionado por la deformación previa provocada por los anteriores ensayos (primer SEL y segundo SEL).

En el 4º lanzamiento (de 362 kJ sobre el paño central) se observó que la pantalla fue capaz de retener el bloque. Sin embargo, el cable perimetral más cercano a la pared se rompió (Figura 84 y Figura 85). Aunque en el DOE realizado en el apartado 5 se obtiene que el cable perimetral no romperá hasta una energía de 530 kJ, esta pantalla había sufrido 3 impactos previos, viendo reducida su energía residual sucesivamente. Este es el motivo por el que el cable perimetral rompió en este cuarto impacto. Aunque no se prevea su rotura para un solo impacto, los ensayos realizados en estas pantallas se llevan a cabo realizando los 3 impactos sucesivamente sin reparaciones entre el segundo SEL y el MEL. Es por ello que para asegurar su resistencia a los 3 impactos en la pantalla de 500 kJ el cable perimetral de diámetro 16 mm fue sustituido por uno de diámetro 20 mm. Aunque este cuarto lanzamiento no está contemplado por la ETAG, se puede decir que cumpliría los requisitos de un ensayo MEL, puesto que la norma solo requiere que la pantalla sea capaz de retener el bloque, sin importar que exista rotura en alguno de sus componentes.



Figura 168. Estado de la malla MT15000 en el paño central después del 4º lanzamiento.



Figura 169. Rotura del cable perimetral.

8.5.4.2 Pantalla de 500 kJ

Los dos impactos SEL resultaron exitosos. La pantalla fue capaz de retener el bloque sin producirse la rotura de ninguno de sus componentes principales.

En el ensayo MEL se produjeron dos acontecimientos. Por una parte, la sujeción del viento superior izquierdo al anclaje deslizó (Figura 71) debido a que los sujetacables no cumplieron correctamente con su función. Debido a esto, dicho viento sufrió un aumento de longitud y dejó el poste con un ángulo mayor a 90º respecto de la pared vertical. Por otra parte, el cable del freno situado en el viento superior derecho (Figura 72) se rompió, quedando el poste colgando del cable

de seguridad. Pese a todo, la pantalla fue capaz de retener el bloque por lo que el ensayo de la pantalla puede considerarse aprobado.

Los rebotes fueron menores que en el caso de la pantalla de 250 kJ, por lo que en ninguno de los 3 impactos el bloque llegó al suelo, sino que quedó retenido en la barrera.

Algunos de los alambres del paño central se estiraron en exceso, se rectificaron, e incluso alguno de ellos se rompió. Esto fue debido a que en esa ubicación se colocó un grillete para evitar que si se producía la rotura del cable del cable de cosido o del cable premontado se deshiciese por completo el cosido y la malla quedase suelta y sin ninguna sujeción (Figura 171). Se comprueba que este mecanismo de prevención resulta contraproducente, pues la holgura que se puede generar entre el cable perimetral y la malla (y por tanto el cable premontado) en el impacto queda condicionada en esa posición por la dimensión de ese grillete.



Figura 170. Deformación y rotura de varios alambres del contorno del paño central (a) y deformaciones en la diagonal del impacto (b)

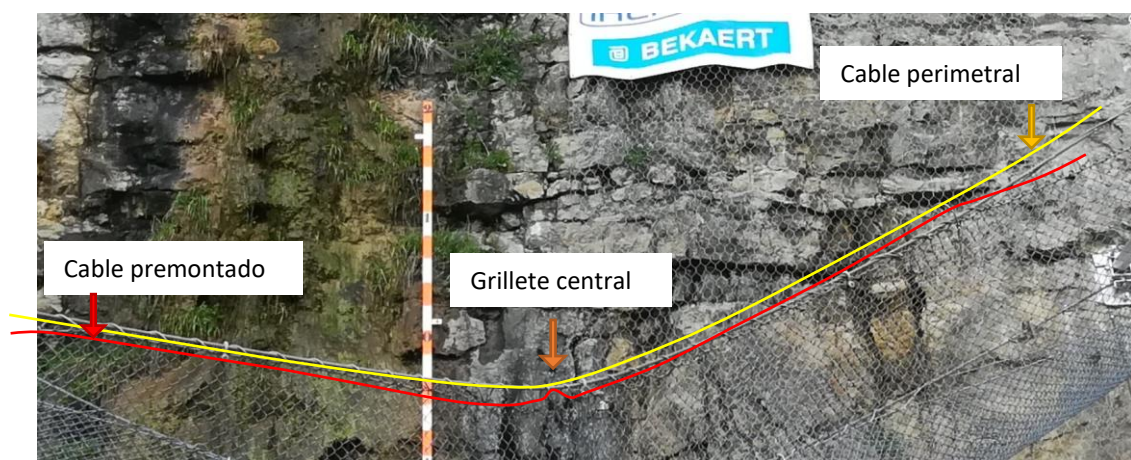


Figura 171. Cosido de la malla al cable perimetral mediante el cable premontado. La incorporación del grillete central incrementa las tensiones en la malla en la zona central.

Finalizado el 3º lanzamiento se observó que el poste derecho quedó bastante deformado (Figura 172) aunque no se apreció ninguna rotura significativa.



Figura 172. Poste derecho deformado después del tercer lanzamiento.

8.5.5 Comportamiento de los frenos

8.5.5.1 Pantalla de 250 kJ

Tras la finalización del 1^{er} impacto se percibió que los frenos de los vientos laterales (1, 2, 7 y 8) se activaron, deformándose entre 6 y 20 cm. Estas observaciones se han extraído de las mediciones tomadas después de cada ensayo. Después del segundo lanzamiento las longitudes de dichos frenos se incrementaron un máximo de 5 cm. Finalizado el tercer lanzamiento se activaron todos los frenos excepto los de los vientos superiores de ambos extremos (3 y 6). Los frenos de los vientos superior intermedios (4 y 5) incrementaron su longitud un máximo de 20 cm.

Se podría asociar el rebote de los bloques en el SEL2 y el MEL a la casi nula activación y, por tanto, absorción de energía por deformación, de los frenos en los vientos superiores, por lo que, gran parte de la energía cinética del bloque es únicamente transmitida a la red.

En la realidad la mayoría de las pantallas instaladas no se colocan en terrenos completamente verticales, sino en terrenos con una menor inclinación en la que la posición de las pantallas tiende más a la verticalidad formando ángulos de hasta 30 grados. Por ello, en caso de que exista un rebote de la roca posterior al impacto, la gravedad actuaría haciendo que el bloque quede detrás de la pantalla.

8.5.5.2 Pantalla de 500 kJ

Los frenos ubicados en los vientos laterales (1, 2, 7 y 8) funcionaron correctamente (Figura 173) en los 3 impactos, aunque cabe destacar que en una inspección una vez desmontada la pantalla se vio que se había producido un deslizamiento en uno de los casquillos de unos 40 mm (Figura 174). El freno del viento superior izquierdo también funcionó correctamente (Figura 175). Como se comentó en la sección anterior, en el tercer impacto el cable del freno situado en el viento superior derecho (Figura 176) se rompió, quedando el poste colgando del cable de seguridad. Se cree que pudo ser debido a un rozamiento inapropiado entre el cable y las aristas vivas de los orificios del freno, puesto que los tubos no se han comprimido totalmente como para poder afirmar que el freno se ha agotado.



Figura 173. Frenos 7 y 8 correspondientes a los vientos laterales del lado derecho de la pantalla después del 3º impacto.



Figura 174. Deslizamiento de un casquillo en el freno F1.



Figura 175. Freno 4 correspondiente al viento superior izquierdo del paño central después del 3º impacto.



Figura 176. Freno 5 correspondiente al viento superior derecho del paño central después del 3º impacto.

9 Comparativa entre las simulaciones numéricas y ensayos in situ

9.1 Introducción

La realización de un análisis comparativo de los registros de fuerzas y los desplazamientos máximos de la pantalla en los casos numérico y experimental resultan fundamentales puesto que permiten analizar el nivel de ajuste con la realidad y, en caso de que existan pequeñas dispersiones, buscar mejoras al modelo que permitan un mayor acercamiento al comportamiento real. Para ello se toman los ensayos experimentales sobre las dos pantallas dinámicas finalmente ensayadas, y se toman los registros numéricos de:

- Cable perimetral trasero (el más cercano al terreno)
- Cable perimetral delantero (el más alejado del terreno)
- Viento lateral trasero
- Viento lateral delantero
- Viento superior

Todos estos registros se toman de los sensores de cable localizados en la mitad izquierda de la pantalla, pues los registros correspondientes a la mitad derecha son aproximadamente iguales.

Aunque en el DOE se comprobó que la pantalla seleccionada sería capaz de resistir hasta 523 kJ, el ensayo se realizó con una energía máxima de 250 kJ (tal y como se explica en el capítulo 8). Por ello, sobre este primer modelo numérico de pantalla se realizaron 2 impactos, el primer SEL en el que se aplicó una energía de 85 kJ y el MEL de 250 kJ. Los impactos se realizaron con un bloque esférico con un diámetro que aporta una equivalencia en peso al bloque real poliédrico. En

segundo lugar, se realizó un modelo para la pantalla 500 kJ, en la que la modificación esencial respecto al modelo anterior es el aumento de diámetro de los cables perimetrales de 16 a 20 mm. Para implementar este nuevo cable fue necesario obtener una curva carga-deformación a través de un ensayo de tracción, ya que no se disponía de datos de cables de estas características. La curva resultante se muestra en la Figura 177. Utilizando una sección equivalente de 176 mm², y aplicando el esquema de la Figura 47 se obtienen los todos los valores necesarios para su correcta definición (Tabla 44).

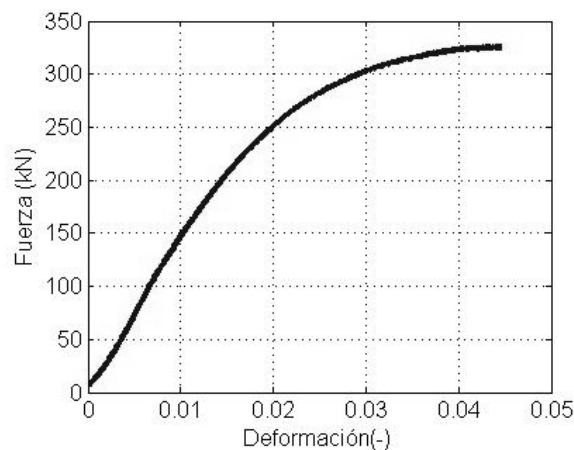


Figura 177. Curva carga-deformación de un cable de acero de diámetro 20 mm

Tabla 44. Propiedades del material del cable de diámetro 20 mm introducidos en el programa de elementos finitos.

| Cable d20 | | |
|-------------------------|--------------------------------|-------------------|
| Comportamiento elástico | Módulo de Young (MPa) | |
| | 80888 | |
| Comportamiento plástico | Plastic log strain (-) | True stress (MPa) |
| | 0.0000 | 1000 |
| | 0.0002 | 1104 |
| | 0.0007 | 1201 |
| | 0.0012 | 1300 |
| | 0.0021 | 1400 |
| | 0.0033 | 1501 |
| | 0.0051 | 1600 |
| | 0.0080 | 1700 |
| | 0.0135 | 1800 |
| | 0,0211 | 1848 |
| Daño | Deformación de fractura | |
| | 0.0211 | |
| | Desplazamiento en el fallo (m) | |
| | 0.000001 | |

Sobre este segundo modelo numérico de pantalla se realizaron 2 impactos, el SEL en el que se aplicó una energía de 165 kJ y el MEL de 500 kJ.

9.2 Comparación de fuerzas y desplazamientos respecto al modelo numérico creado

Desde la Figura 178 a la Figura 181 se muestran las curvas comparativas entre los registros de fuerza-tiempo experimental y numérica, en primer lugar de la pantalla de 250 kJ y en segundo lugar de la pantalla de 500 kJ.

En el primer ensayo SEL sobre la pantalla de 250 kJ los resultados experimentales indican que la pantalla real es ligeramente más rígida que su correspondiente simulación numérica, puesto que se tienen valores experimentales de cargas mayores que en la realidad, exceptuando el viento superior.

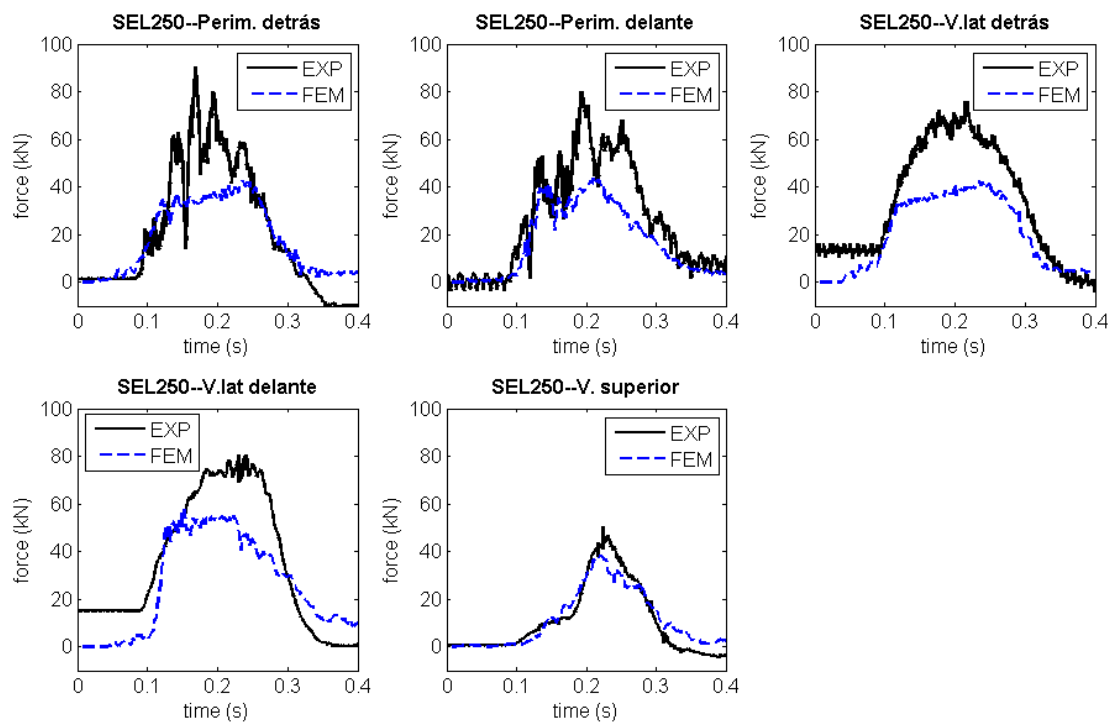


Figura 178. Gráficas Carga-tiempo del primer ensayo SEL en la pantalla de 250 kJ. Comparativa entre los ensayos experimentales y la simulación numérica.

Los resultados del impacto MEL son mucho más ajustados, obteniéndose numéricamente picos de fuerza muy similares en el cable perimetral delantero, en el viento lateral trasero y en el viento superior (Figura 179).

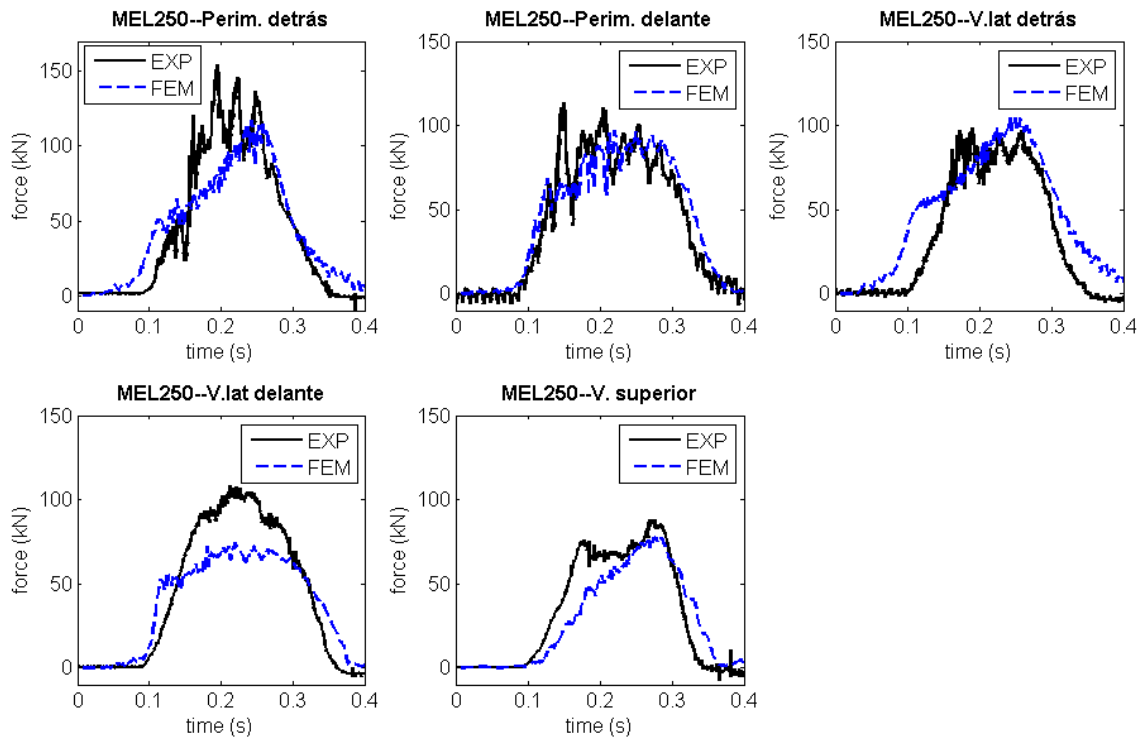


Figura 179. Gráficas Carga-tiempo del ensayo MEL en la pantalla de 250 kJ. Comparativa entre los ensayos experimentales y la simulación numérica.

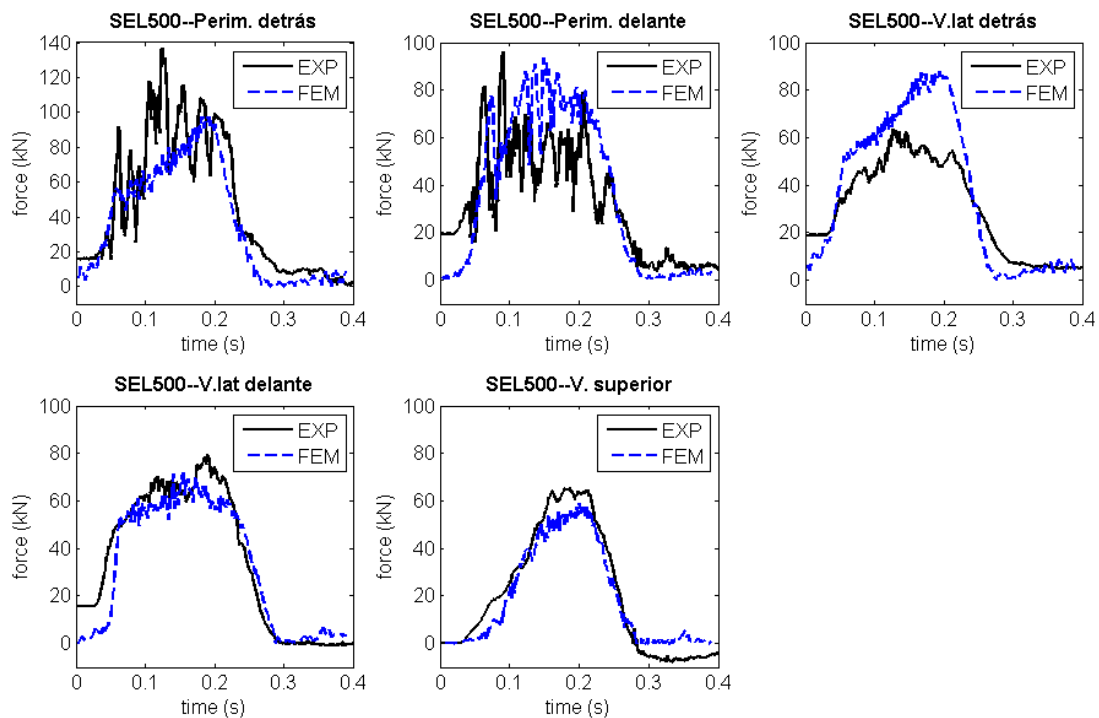


Figura 180. Gráficas Carga-tiempo del primer ensayo SEL en la pantalla de 500 kJ. Comparativa entre los ensayos experimentales y la simulación numérica.

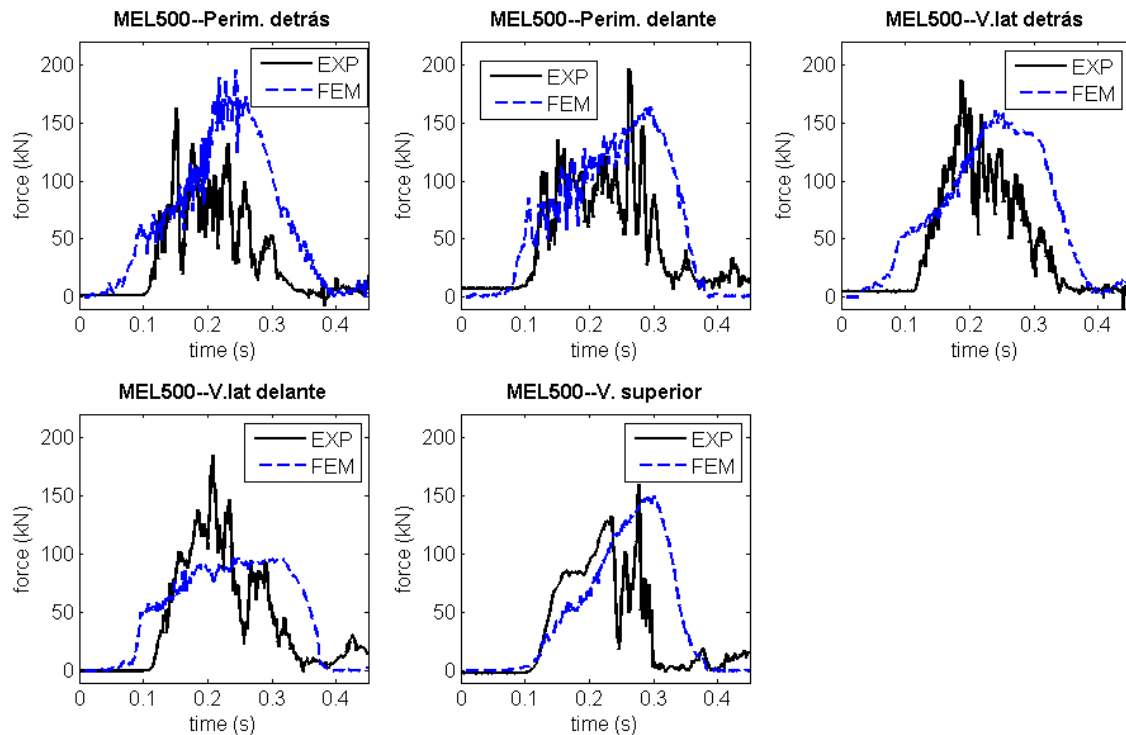


Figura 181. Gráficas Carga-tiempo del ensayo MEL en la pantalla de 500 kJ. Comparativa entre los ensayos experimentales y la simulación numérica.

En lo que se refiere a la pantalla de 500 kJ, tanto en el impacto SEL1 (Figura 180) como en el MEL (Figura 181) se produce un muy buen ajuste de las fuerzas máximas en los cables. En el caso MEL el tiempo de aplicación de las cargas es mayor en el modelo numérico que en el experimental puesto que los dos impactos anteriores al MEL (SEL1 y SEL2) rigidizan la pantalla al haberse activado ya algunos frenos de forma importante. Esto no ocurre en la pantalla de 250 kJ ya que la activación de los frenos es muy baja durante los dos impactos SEL.

Excepto en el modelo de impacto SEL de la pantalla de 250 kJ, el resto de los registros numéricos reproducen con bastante exactitud los valores máximos de las cargas en los cables. Los valores más alejados aparecen en prácticamente todos los casos en los vientos laterales delanteros.

En cuanto a los valores de flecha máxima, y tal como se razonó en la sección 3.5.1.3, únicamente se comparan valores correspondientes al primer impacto SEL. Al realizar dicha comparación (Tabla 45) se observa que en el primer impacto SEL de la pantalla de 250 kJ se llega a obtener una divergencia de hasta el 32%.

Tabla 45. Máxima flecha obtenida en el primer impacto SEL de ambas pantallas, tanto en el ensayo experimental como en la simulación numérica.

| | | PANTALLA DE 250 kJ 1º IMPACTO SEL (85 kJ) | PANTALLA DE 500 kJ 1º IMPACTO SEL (167 kJ) |
|---------------|--|--|---|
| Máxima flecha | Ensayo experimental (deformación inicial + flecha por impacto) | 2,67 | 3,47 |
| | Simulación numérica ABAQUS | 3,54 | 4,21 |
| Error (%) | | 32% | 21% |

Viendo estos resultados, y aunque la simulación responde de forma más aproximada para modelos con mayor energía de impacto, se decide buscar una alternativa que permita ajustar mejor los desplazamientos, manteniendo, o incluso mejorando la aproximación en los valores de carga. El primer paso consistió en identificar cual sería el posible motivo del exceso de flecha. La causa más probable es que, al contrario de lo esperado, la malla de alambre deslizó muy poco a lo largo del cable premontado. Por ello se decide cambiar la conexión malla-cable premontado, que se hacía mediante grilletes con un coeficiente de rozamiento de 0,4 por una unión fija entre ambos componentes, tal y como se representa en la Figura 182. La unión al cable perimetral se seguirá haciendo mediante grilletes cada 3 retículas, que es por donde pasa el cable de cosido en la estructura real.

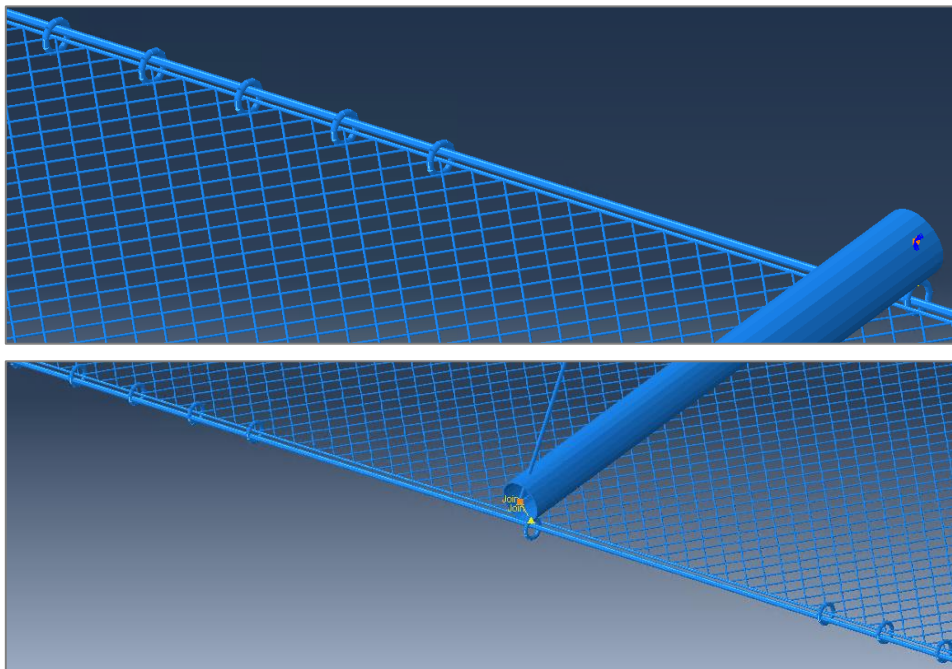


Figura 182. Nueva conexión fija entre los cables premontados y la malla de alambre MT15000. Detalles de la parte trasera cercana a la base del poste y delantera cercana a la cabeza.

Empleando esta nueva disposición, y manteniendo el resto de las características del modelo numérico anterior, se recalculan las fuerzas en los cables durante los impactos SEL1 y MEL. En las figuras 180 a 184 se muestran los nuevos resultados.

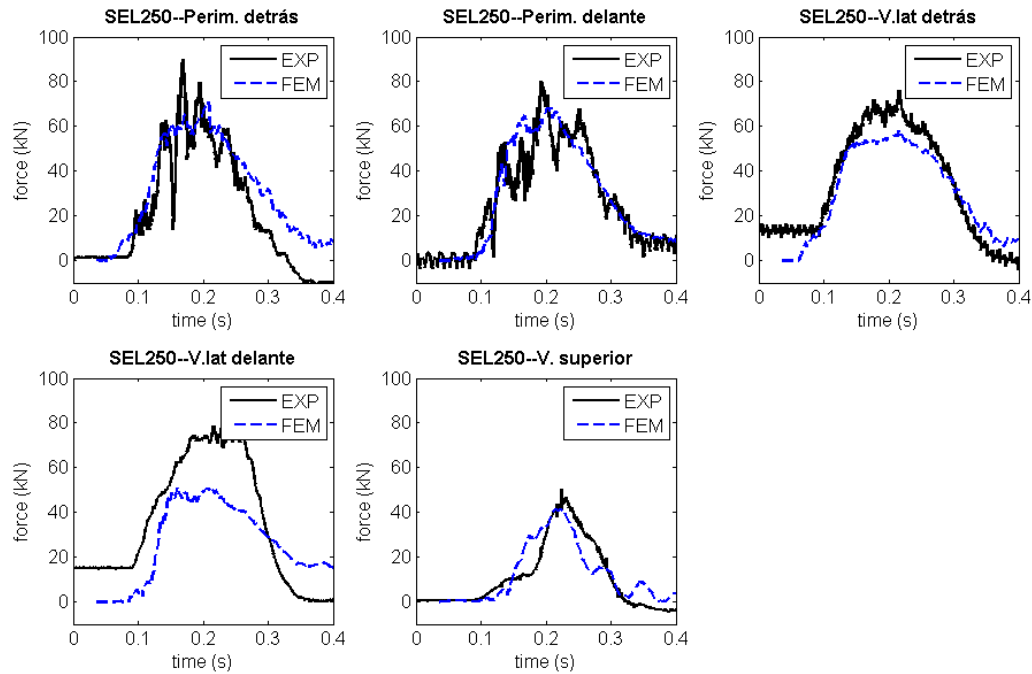


Figura 183. Gráficas Carga-tiempo del primer ensayo SEL en la pantalla de 250 kJ. Comparativa entre los ensayos experimentales y la simulación numérica modificada.

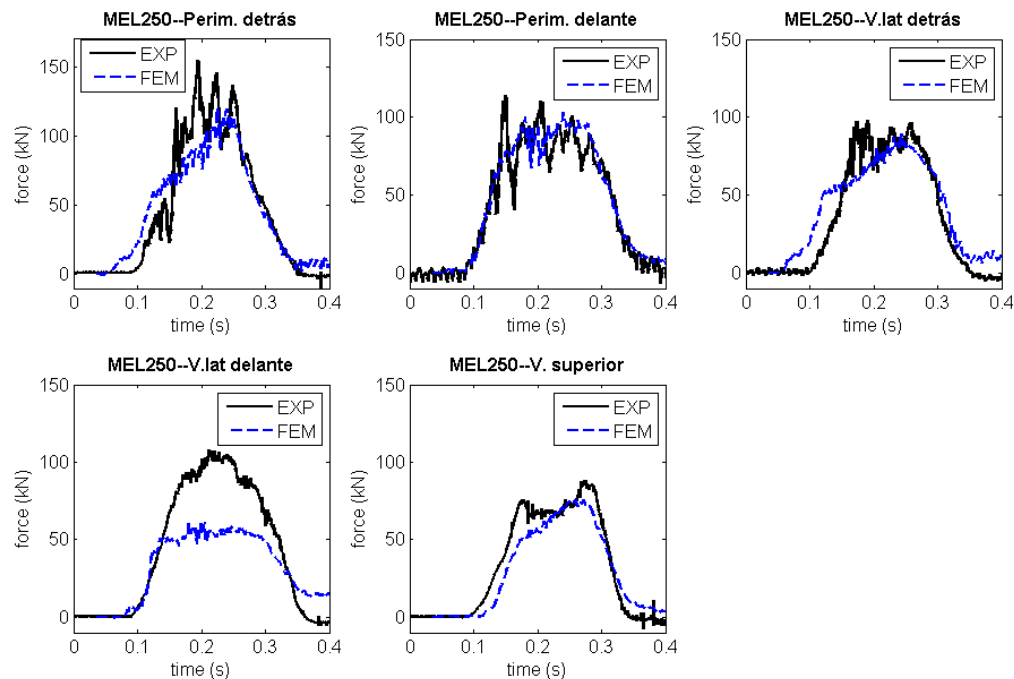


Figura 184. Gráficas Carga-tiempo del ensayo MEL en la pantalla de 250 kJ. Comparativa entre los ensayos experimentales y la simulación numérica modificada.

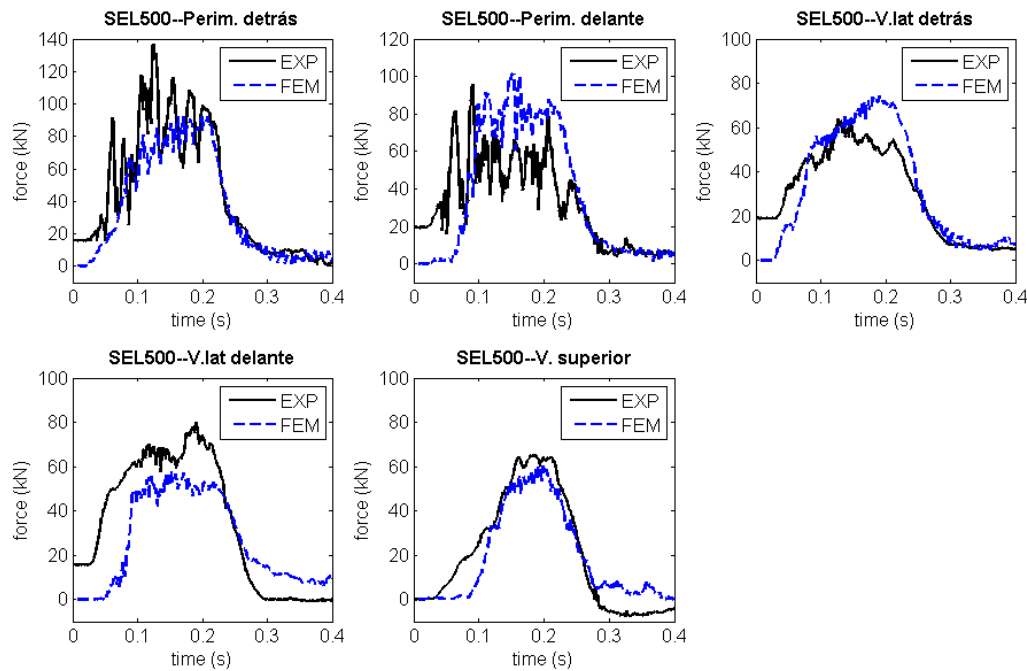


Figura 185. Gráficas Carga-tiempo del primer ensayo SEL en la pantalla de 500 kJ. Comparativa entre los ensayos experimentales y la simulación numérica modificada.

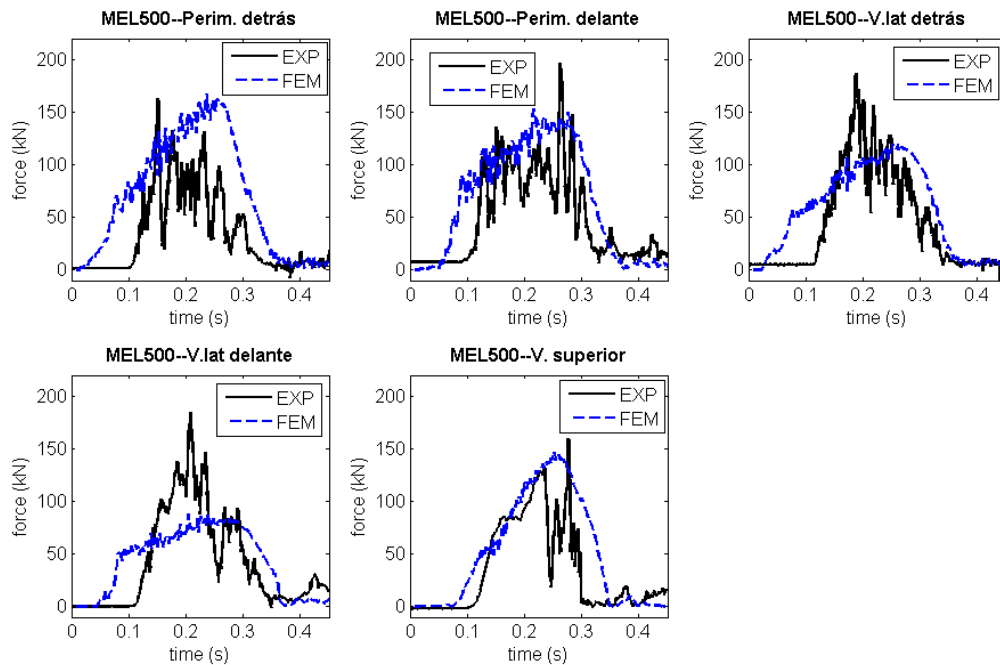


Figura 186. Gráficas Carga-tiempo del ensayo MEL en la pantalla de 500 kJ. Comparativa entre los ensayos experimentales y la simulación numérica modificada.

Tabla 46. Máxima flecha obtenida en el primer impacto SEL, tanto en el ensayo experimental como en las simulaciones numéricas original y modificada.

| | | PANTALLA DE 250 kJ 1º IMPACTO SEL (85 kJ) | PANTALLA DE 500 kJ 1º IMPACTO SEL (167 kJ) |
|--------------------|---|--|---|
| Máxima flecha | Ensayo experimental (deformación inicial + flecha por impacto) | 2,67 | 3,47 |
| | Simulación 1 ($\mu = 0,4$) | 3,54 | 4,21 |
| | Simulación 2 (unión fija cable premontado y malla) | 3,17 | 3,40 |
| Error Simulación 1 | | 32% | 21% |
| Error Simulación 2 | | 19% | 2% |

Se demuestra que el nuevo modelo, en el que se une físicamente, sin opción a ningún tipo de deslizamiento, los cables premontados que recorren los laterales de mayor longitud de la membrana, y la propia membrana MT15000, mejora los resultados de flecha (

Tabla 46). Los registros de carga se aproximan más en el caso del impacto SEL sobre la pantalla de 250 kJ, aunque no lo hacen, sino que se mantienen aproximadamente iguales en el resto de los casos.

Sin embargo, la unión fija de ambos componentes no es real y el modelo sufre, en el cable premontado, cargas mayores a las reales debido a la inhabilitación de la malla a deslizar sobre este, sobre todo en las zonas cercanas al poste, en las que no se establece un cosido de la red y los cables perimetrales. Como consecuencia, el cable premontado del modelo numérico modificado que se encuentra más cercano a la base de los postes, en el caso del impacto MEL pantalla de 500 kJ, rompe prematuramente por 2 sitios simétricos, al contrario de lo que ocurre en la realidad (Figura 187). Los elementos representados en color rojo son aquellos en los que se ha producido la rotura ya que han superado la resistencia última del material.

Esto se traduce en que, si se intentase hacer de nuevo el DOE con el nuevo modelo numérico, el elemento más débil sería siempre el cable premontado, que rompería de forma irreal, y la rotura posterior de multitud de elementos de la membrana desvirtuarían los resultados.

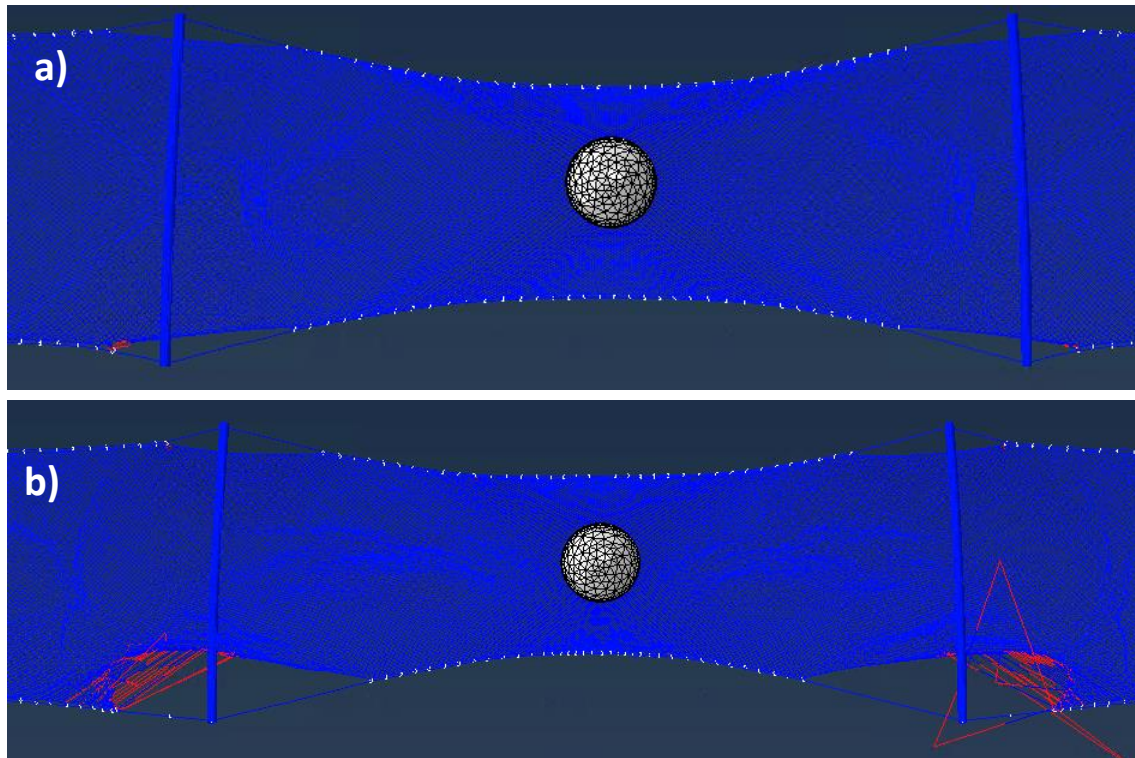


Figura 187. Fallo que provoca roturas en la simulación numérica modificada: a) instantes inmediatamente posteriores a la rotura del cable premontado, y b) instante de máxima flecha en el que también rompen numerosos alambres de la membrana.

La solución a este problema consiste en aumentar o bien la resistencia del material de los cables premontados, o bien aumentar ligeramente su diámetro. Estas dos vías permiten evitar la rotura de dicho cable en el impacto MEL de la pantalla de 500 kJ. Además, apenas se producen diferencias en cuanto a carga y flecha respecto a los modelos con el cable premontado real. Sin embargo, la solución, aunque efectiva, resulta ser un artificio, ya que se está presuponiendo que el cable premontado posee una mayor carga de rotura que la real. Por ello, la solución propuesta solo sería de utilidad para estos modelos en concreto en los que sabemos a ciencia cierta, mediante los ensayos experimentales, que no van a producirse roturas en ninguno de los cables premontados. Si se tratase de diseñar una nueva pantalla mediante DOE, sería imposible conocer el instante de rotura real de estos cables, por lo que los resultados serían poco fiables.

Por tanto, el modelo inicial, aunque menos preciso en los desplazamientos, resulta ventajoso en tanto en cuanto no provoca resultados de rotura prematuros. Además, podríamos decir que con el modelo inicial estaríamos del lado de la seguridad puesto que, al obtener valores más altos de desplazamiento, la pantalla habría de situarse en consecuencia para evitar que al alcanzar la máxima elongación alcanzase el sitio a proteger. Ya que se obtienen valores numéricos de flecha mayores a los reales, en ningún caso aparecerían daños materiales de la zona a proteger puesto que existiría un margen de entre un 32 y 21% en relación a la deformación real.

10 Mejoras aplicables en la pantalla final

El ensayo experimental sobre las dos pantallas descritas en la Sección 8 fue, además de un paso esencial para la corroboración de la resistencia energética de los modelos, una primera toma de contacto con el producto real. Si bien los modelos numéricos pueden ofrecer resultados muy próximos a los reales, la simplificación que a ellos se aplica puede hacer pasar desapercibidos algunos comportamientos que pueden darse en la realidad.

Como ejemplo, uno de los elementos en los que existía bastante incertidumbre previa a los ensayos era el cable de cosido, pues los modelos de elementos finitos no disponían de este elemento ya que se simplificaba con la utilización de grilletes que, al ser simulados como elementos rígidos, no sufrían roturas en ningún caso. Tras los ensayos se vio que el cable de cosido funcionó a la perfección no apreciándose signos de inminente rotura o de erosión en ninguna de las dos pantallas.

Sin embargo, mediante un análisis visual del producto terminado, se han podido distinguir comportamientos de la pantalla indicativos de que ciertas mejoras deberían ser aplicadas antes de la comercialización del producto. Por último, también se comentarán ciertos cambios que se traducirán en una mayor eficiencia en cuanto a instalación y montaje.

10.1 Instalación

La malla MT15000 utilizada en los ensayos experimentales se transportó desde las instalaciones de Inchalam S.A. en Talcahuano (Chile) hasta el lugar de ejecución de los ensayos en paños de 30 metros de longitud y 4 metros de ancho, que corresponde a la dimensión total de las pantallas que se han ensayado. Así pues, aprovechando la continuidad de la malla, se decide instalar sin realizar ningún corte a la misma. Esto supuso un gran esfuerzo y utilización de gran cantidad de medios auxiliares y operarios (Figura 153).

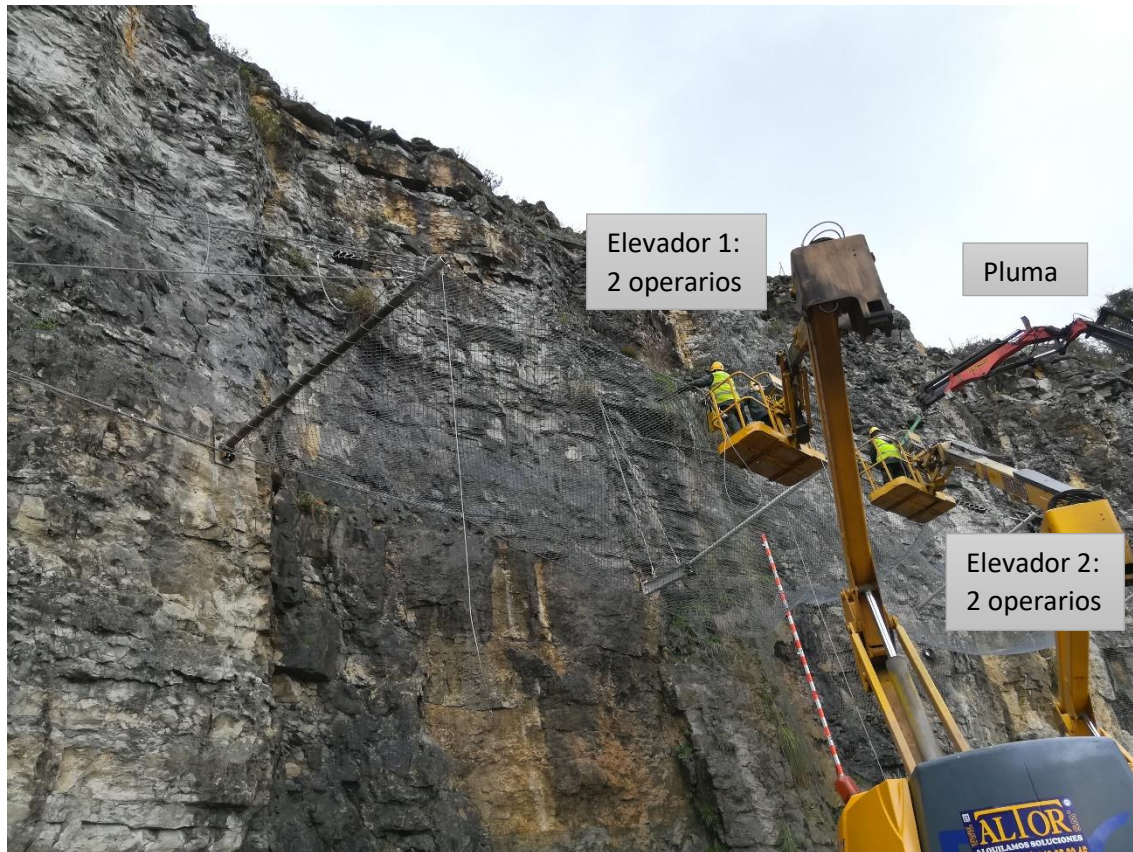


Figura 188. Recursos implicados en la instalación de la pantalla dinámica.

Aunque para los ensayos experimentales el montaje no fue excesivamente complejo gracias al fácil acceso de la maquinaria al punto de instalación, la colocación de la malla de una sola pieza resulta casi inviable en la puesta en obra real, pues la orografía y punto exacto de instalación de la pantalla puede no ser cercanos a carreteras o zonas que permitan acceso a la maquinaria.

Por ello se deben buscar una o varias alternativas que permitan transportar y montar la malla en paños de menor longitud, puesto que son más fácilmente manejables incluso por aire (en caso del empleo de helicópteros). Se plantea por tanto dividir los paños en longitudes de 5; 7; 5 ó 10 metros de longitud. La unión entre paños se podrá realizar por tres sistemas diferentes. El primero consiste en emplear grilletes que tengan una resistencia similar o superior a los alambres. El segundo método consiste en el empleo de “clips”. Pueden emplearse clips comerciales, o incluso realizar un diseño propio de clip empleando el mismo tipo de alambre, siempre realizando ensayos experimentales de tracción como los descritos en el apartado 2.4.4 para conocer su resistencia última. El último sistema consiste en el empleo de un alambre en espiral, de misma resistencia que el utilizado en la malla MT15000, que se va trenzando a los dos laterales de los dos paños a unir en todo el ancho de la malla. Utilizando este sistema no se modificaría la rigidez de la membrana en el sentido del ancho de la misma. Sin embargo, la rotura del cable en espiral en algún punto podría provocar el descosido de ambas partes, no asegurando que pueda mantener

los dos paños unidos pues podría producirse el descosido. No ocurre lo mismo con el uso de grilletes o clips, pues la rotura de uno de ellos es independiente y solo afecta a la unión entre dos retículas.

Otra manera de aligerar la malla para una mejor maniobrabilidad consiste en la modificación de la malla aumentando la calidad de su acero para así poder reducir el diámetro de los alambres. El acero de la malla MT15000 tiene una tensión de rotura de 890 MPa, pero se sabe que existen aceros de alta resistencia que pueden soportar una tensión de hasta 1960 MPa. Otras mallas del mercado, como la Tecco, utilizan aceros de 1770 MPa. Esta malla está patentada por la compañía Geobrigg, por lo que habrá que tener especial atención a las especificaciones de dicha patente para no concurrir en plagio. Se cree que la forma más sencilla de evitarlo es usando acero de otra calidad similar.

10.2 Funcionamiento

En los ensayos experimentales se comprobó que el ángulo de giro del poste permitido por la placa de anclaje era suficientemente amplio para el caso de pantallas colocadas en galería (es decir, en paredes verticales con ángulos positivos entre 6 y 12 grados respecto a la horizontal). Por el contrario, se aprecia que en pantallas erguidas en terrenos de menor pendiente colocadas en posición aproximadamente vertical, la amplitud de giro permitido podría ser insuficiente, puesto que para que la pantalla en esta configuración no vuelque se coloca con un ángulo entre 15 y 20° respecto a la vertical en sentido opuesto al de anclaje de los vientos superiores o tirantes.

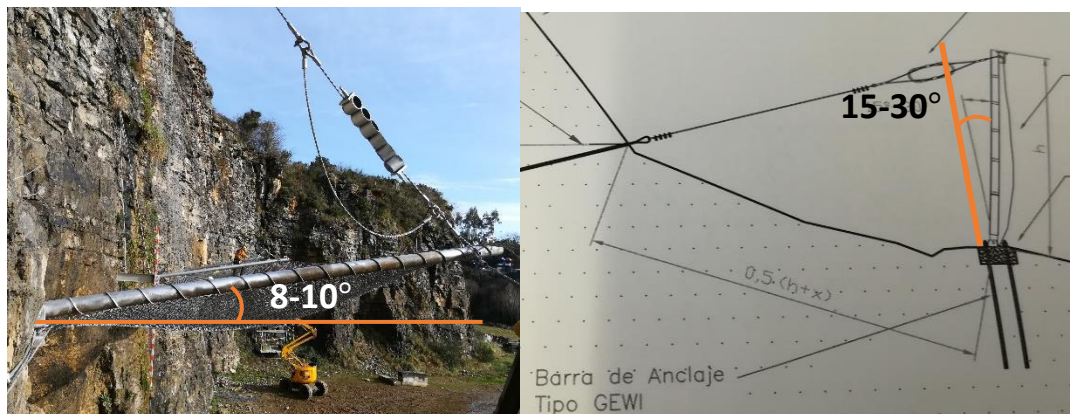


Figura 189. Ángulo a) respecto a la horizontal de una pantalla dinámica en galería y b) respecto a la vertical de una pantalla dinámica en un terreno de menor pendiente.

El giro del poste unido a la placa se ve limitado por el impacto del tubo principal del poste contra una de las partes de la placa de anclaje, concretamente la parte horizontal de la chapa plegada superior, que es la que sujeta el perno de conexión con el poste (Figura 190). Previamente, en el proceso de diseño de esta placa, se había planteado la posibilidad de situar las aletas del poste

que enlazan con el perno y con la placa de anclaje por la parte exterior de esta placa plegada. Sin embargo, debido al bajo diámetro del poste, no fue posible esta modificación, ya que eliminaría la posibilidad de insertar el tornillo vertical que sirve de guía para el cable perimetral.



Figura 190. Espacio entre la placa de anclaje y poste que permite un giro limitado del poste.

La opción que queda como única posible es el aumento de la distancia entre el perno horizontal y la base de la placa plegada. Aumentando esta longitud 3 centímetros se consigue que el giro del poste respecto de la placa aumente hasta los 50º respecto de la perpendicular de la placa. Los planos definitivos de la placa se encuentran en el Anexo IV.

Otra mejora que podría contribuir a una optimización del funcionamiento de la pantalla se relaciona con el cosido de la malla a los cables perimetrales. Después de los ensayos a las dos pantallas de 250 y 500 kJ se observa que el valor de la altura de la malla en los postes después del primer ensayo SEL es cuantitativamente menor que la altura residual. Por tanto, se podría incrementar la distancia sin cosido de la malla al cable perimetral alrededor del poste, por ejemplo, a 1,5 metros.

El siguiente punto de posible mejora se vislumbra a través del DoE. Aunque en el caso de la pantalla que se ha podido certificar a una energía de 500 kJ, el cable premontado no sufrió ninguna rotura, existen otros casos como los analizados en el el DoE en los que podría ocurrir. Puesto que no es posible incrementar su diámetro ya que no cabría en la malla, habría que plantearse el diseño de un nuevo método de cosido de la malla a los cables perimetrales que eliminara este factor limitante de la energía absorbida. La alternativa más clara es el uso de clips similares a los que se utilizarían para conectar los paños de malla. En este caso habría que asegurar que en dichos clips caben cables de diámetro 20 mm y que son capaces de deslizarse consiguiendo el deseado “efecto cortina”. Esta mejora también contribuiría a reducir el tiempo de instalación ya que el

tiempo de colocación de todos los clips es mucho más reducido que el de cosido de toda una pantalla.

En cuanto a la forma y configuración de los vientos superiores, se cree que una alternativa que eliminaría los problemas surgidos de rotura y/o deslizamiento indeseado de los mismos es el aumento del diámetro del cable que los compone. Si lo que se desea es evitar modificar el freno en sí, el máximo diámetro posible sería de 20 mm. El aumento de un diámetro más allá de los 20 mm implicaría aumentar el diámetro de los orificios de los frenos. En este caso se recomienda aumentar la longitud de los tubos tanto como el incremento de diámetro de los orificios, con el fin de evitar una reducción de capacidad de absorción de energía. De todas maneras, se recomienda realizar un ensayo experimental de los tubos con el nuevo diámetro para comprobar su resistencia al realizar dichas modificaciones.

En un primer momento se decidió instalar un solo viento por poste debido al ahorro en material y anclajes y por la menor área de exposición de estos sobre los paños. Sin embargo, después de los ensayos experimentales se considera que la instalación de 2 vientos por poste podría contribuir a evitar los problemas que surgieron en los dos vientos centrales; es decir, el agotamiento del freno o el deslizamiento de los sujetacables. Esto solo supondría realizar una perforación más respecto al caso en el que solo se dispone de un viento por poste, pues un anclaje sirve para sujetar 2 vientos, excepto en los anclajes extremos en los que solo se sujeta uno. Con 2 vientos por cada poste la carga vertical se repartiría reduciendo los riesgos anteriormente mencionados. Además, utilizando la nueva disposición de vientos superiores la pantalla resistirá un mayor nivel de energía. El único inconveniente que se vislumbra en el empleo de esta nueva configuración es el aumento de la probabilidad de que la roca impacte sobre estos vientos en su recorrido y que, en consecuencia, se produzca su rotura es mayor.

Por último, se determina que sería conveniente una reducción de la altura de rebote que se produce en la pantalla de 250 kJ. Para ello una de las alternativas que se plantean es eliminar el cosido de la malla a los postes extremos, ya que la liberación de esta restricción contribuye al incremento del desplazamiento de la malla hacia el punto de impacto del bloque. Esto se traduce en un mayor tiempo del impacto y por tanto un mayor amortiguamiento del mismo. A consecuencia de la eliminación del cosido a los postes, tras un impacto la pantalla tendría una menor altura residual. Pese a esto, los resultados de la Tabla 41 y la Tabla 42 muestran en la que la máxima relación entre la altura residual y la altura nominal es siempre mayor al 68%, por lo que tras la modificación mencionada no se espera que superen el umbral mínimo (del 50%) para la reducción de la categoría de la pantalla de la A a la B.

11 Conclusiones y futuras líneas de investigación

Las principales conclusiones y contribuciones de la presente tesis son las siguientes:

- Las redes de cables triangulares absorben distinta cantidad de energía por unidad de masa dependiendo de su orientación, y ésta siempre es menor que la de la red cuadrada y de la malla de alambre MT15000, debido a la reducción del diámetro de los cables respecto a la red cuadrada (diámetro 6 frente a diámetro 8), y a que el cable que genera la diagonal de la red cuadrada para formar la red triangular limita la deformación de dicho cuadro. Al reducirse la deformación se reduce la flecha.
- Entre las redes analizadas, la malla MT15000 ha sido la que más energía ha sido capaz de absorber, tanto en términos absolutos como de eficiencia en relación a su masa. Para ello no solo se han analizado los ensayos estáticos, sino que estos se han utilizado para calibrar modelos de elementos finitos y realizar simulaciones dinámicas sobre un paño de red y sobre una pantalla completa, con el fin de estudiar las redes en las condiciones de contorno y cargas dinámicas reales a las que estarán sometidas.
- Se ha desarrollado un disipador de energía que funciona principalmente por plastificación de sus componentes. Su principal ventaja, a diferencia de los frenos cuyo sistema de disipación principal es la fricción, es un sistema que presenta una curva Carga-Desplazamiento completamente regular, por lo que se conoce a ciencia cierta su energía de activación, su desplazamiento máximo y su energía absorbida, con muy poca variabilidad de unas muestras a otras.

- Mediante un análisis DoE se obtiene que los cuatro factores analizados (estos son, ancho y longitud de los paños, número y localización de los frenos y cosido de la malla en las inmediaciones de los postes) influyen en la energía que una pantalla dinámica es capaz de absorber debido al impacto de un bloque. La cuantificación de la influencia de dichos parámetros en la respuesta se manifiesta a través de una ecuación de regresión de segundo orden en las que participan tanto las variables o factores independientes como la interacción entre ellos.
- El diseño de los postes y de las placas de anclaje se hace ex profeso en función de las cargas previstas en el modelo que se ensayará, extraídas del modelo de elementos finitos tanto en la cabeza como en la base del poste.
- A la vista de los resultados experimentales de la pantalla completa, se comprueba que el cable perimetral de diámetro 16 mm no es suficiente para contener el impacto previsto de 500 kJ.
- La simulación numérica de las pantallas completas implementadas en esta tesis ofrece buenos resultados de registros de carga, aunque sobreestiman los valores de máxima elongación en los ensayos SEL en un 32% en la pantalla 1 (250 kJ) y 21% en la pantalla 2 (500 kJ). Se ofrece una solución que consiste en la unión fija de los cables premontados y la membrana, consiguiendo así reducir el error en los resultados a un 19% en la pantalla 1 (250 kJ) y 21% en la pantalla 2(500 kJ). Sin embargo, este modelo no es válido para el impacto MEL de 500 kJ, puesto que se produce la rotura de uno de los cables premontados y sucesiva rotura de los alambres de la membrana. Este problema se solucionaría con el aumento artificial (es decir, irreal) de la resistencia del cable, aunque de esta forma sería imposible tener conocimiento de sus tensiones reales y por tanto predecir su rotura. Por tanto, se decide mantener el modelo original, que reproduce correctamente las cargas en los cables y es conservador en sus valores de máxima flecha.

Las futuras líneas de investigación que se plantean a partir de la presente tesis doctoral son las siguientes:

- El diseño de disipadores de energía con cables de diámetro 20 mm, que permitan la máxima compresión de los tubos de 133 mm y 10 mm y, por tanto, disipar la máxima energía posible.
- El uso de la malla de alambre MT15000 en pantallas de protección contra flujos de detritos por su alta deformabilidad y resistencia. Gracias al tamaño de su retícula será capaz de retener todos los componentes sólidos del flujo (rocas, ramas, tierra) dejando pasar los fluidos (agua, lodo). Para el estudio del comportamiento de esta malla frente a cargas

mixtas de fluido y sólido habrán de emplearse programas de elementos discretos (DEM), de dinámica de fluidos (CFD) o mixtos FEM+DEM+CFD.

- El diseño de nuevos clips de conexión entre paños de la malla de alambre, así como de conexión entre las retículas de la malla y los cables perimetrales, con el fin de evitar el cable auxiliar y de cosido, reduciendo así el tiempo de instalación. Utilizando el mismo alambre que el que emplea la malla MT15000, sería necesario pensar en una geometría que combine sencillez y versatilidad para que sea útil en ambas ubicaciones y resistencia con el fin de que una malla que disponga de un cosido mediante clips posea, al menos, la misma capacidad de carga que una sin cosido intermedio.

12 Referencias

Abaqus Analysis User's Manual, Version 6.13 Dassault Systmes Simulia Corp, Providence, RI.

Al-Budairi H, Gao Z, Steel A, Davies T, Wheeler S (2017) Improving the design of low-energy rockfall catch fences. 6th Interdisciplinary Workshop on Rockfall Protection. Barcelona. Spain.

Arndt B, Ortiz T, Group R (2013) Testing of Rockfall Post Foundations in Colorado. In Proceedings of the 64th Highway Geology Symposium, North Conway, NH, USA, 9–12 September 2013.

Bertrand D, Trad A, Limam A, Silvani C (2012). Full-scale dynamic analysis of an innovative rockfall fence under impact using the discrete element method: From the local scale to the structure scale. *Rock Mech Rock Eng*, 45(5): 885-900. DOI: 10.1007/s00603-012-0222-5

Blanco-Fernandez E, Castro-Fresno D, Del Coz Díaz JJ, Díaz J (2013) Field measurements of anchored flexible systems for slope stabilisation: Evidence of passive behaviour. *Eng Geol*, 153, pp. 95-104. DOI: 10.1016/j.enggeo.2012.11.015

Bourrier F, Lambert S, Baroth J (2015) A Reliability-Based Approach for the Design of Rockfall Protection Fences. *Rock Mech Rock Eng* 48(1): 247–259.

Castanon-Jano L, Blanco-Fernandez E, Castro-Fresno D, Ballester-Muñoz F (2017) Energy Dissipating Devices in Falling Rock Protection Barriers. *Rock Mech Rock Eng*, 50 (3): 603-619. DOI: 10.1007/s00603-016-1130-x

Castro Fresno D. (2000) Estudio y análisis de membranas flexibles como elemento de soporte para la estabilización de taludes y laderas de suelos y/o materiales sueltos. Tesis doctoral. Universidad de Cantabria.

Castro-Fresno D, del Coz Díaz JJ, López LA, García Nieto PJ (2008), Evaluation of the resistant capacity of cable nets using the finite element method and experimental validation *Eng Geol*, 100 (1): 1-10, ISSN 0013-7952, DOI: 10.1016/j.enggeo.2008.02.007.

Castro-Fresno D, Del Coz Díaz JJ, Garcia Nieto PJ, Norambuena Contreras J (2009) Comparative analysis of mechanical tensile tests and the explicit simulation of a brake energy dissipater by FEM. *Int J Nonlinear Sci Numer Simul* 10 (8): 1059-1085. DOI: 10.1515/IJNSNS.2009.10.8.1059

Castro-Fresno D, López Q L, Blanco-Fernandez E, Zamora-Barraza D (2009b) Design and evaluation of two laboratory tests for the nets of a flexible anchored slope stabilization system. *Geotech Test J*, 32 (4): 315-324. DOI: 10.1520/GTJ101218

Chen Y, Li J, Ran L (2013) A review of rockfall control measures along highway. *Applied Mechanics and Materials*, 353-356:2385-2391. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.353-356.2385

de Miranda S, Gentilini C, Gottardi G, Govoni L, Mentani A, Ubertini F (2015) Virtual testing of existing semi-rigid rockfall protection barriers. *Eng Struct* 85: 83-94. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.12.022.

del Coz Díaz J J, Nieto P J G, Fresno D C, Fernández E B (2009). Non-linear analysis of cable networks by FEM and experimental validation. *International Journal of Computer Mathematics*, 86(2), 301-313. DOI: 10.1080/00207160801965339.

del Coz Díaz J J, García Nieto P J, Castro-Fresno D, Rodríguez-Hernández J (2010). Nonlinear explicit analysis and study of the behaviour of a new ring-type brake energy dissipator by FEM and experimental comparison. *Appl Math Comp*, 216(5):1571-1582. DOI: 10.1016/j.amc.2010.03.009

EN 13411-5:2004+A1:2008. Terminations for steel wire ropes - Safety - Part 5: U-bolt wire rope grips. Brussels.

EN 1537:2015. Execution of special geotechnical works - Ground anchors. Brussels.

Escallón JP, Wendeler C (2013) Numerical simulations of quasi-static and rockfall impact tests of ultra-high strength steel wire-ring nets using Abaqus/Explicit. 2013 SIMULIA Community Conference.

Escallón JP, Wendeler C, Chatzi E, Bartelt P (2014) Parameter identification of rockfall protection barrier components through an inverse formulation. *Eng Struct* 77: 1-16. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.07.019.

Escallón JP, Boetticher V, Wendeler C, Chatzi E, Bartelt P (2015) Mechanics of chain-link wire nets with loose connections. *Eng Struct* 101: 68-87. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.07.005.

EOTA (2008). Guideline for the European technical approval of falling rock protection kits. Tech. Rep., European Organization for Technical Approvals (ETAG 27) Feb 2008, Brussels.

Fonseca R.J.L. (1995) Desarrollo de nuevos sistemas de protección de taludes y laderas rocosas: Pantallas dinámicas. Tesis doctoral, Universidad de Cantabria, Santander.

Fulde M, Müller M (2013). Development of a modular brake element for the use in modern rockfall catchment fences. 64TH HIGHWAY GEOLOGY SYMPOSIUM, 297-314.

Gentilini C, Govoni L, de Miranda S, Gottardi G, Ubertini F (2012) Three-dimensional numerical modelling of falling rock protection barriers. *Comput Geotechn*, 44: 58-72. DOI: 10.1016/j.compgeo.2012.03.011.

Gentilini C, Gottardi G, Govoni L, Mentani A, Ubertini F (2013). Design of falling rock protection barriers using numerical models. *Eng Struct*, 50, 96-106. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.07.008

Gerber W (2001). Guideline for the approval of rockfall protection kits. Swiss agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL), Swiss federal research institute WSL, Berne.

Grassl H, Bartelt P A, Volkwein A, Wartmann S (2003). Experimental and numerical modeling of highly flexible rockfall protection barriers. Soil and Rock America 2003, Cambridge, Massachusetts.

Koo RCH, Kwan JSH, Lam C, Ng CWW, Yiu J, Choi CE, Ng AKL, Ho KKS, Pun WK (2016) Dynamic response of flexible rockfall barriers under different loading geometries. Landslides, 1-12. DOI: 10.1007/s10346-016-0772-9.

López Quijada L (2007). Desarrollo y análisis de una pantalla dinámica para la disipación de impactos de baja energía, como elemento de protección contra la caída de rocas, utilizando modelos matemáticos, programas de elementos finitos y ensayos de laboratorio, tomando en cuenta variables dinámicas. Tesis doctoral, Universidad de Cantabria, Santander.

Mentani A, Giacomini A, Buzzi O, Govoni L, Gottardi G, Fityus S (2016a) Numerical modelling of a low-energy rockfall barrier: New insight into the bullet effect. Rock Mech Rock Eng, 49 (4): 1247-1262. DOI: 10.1007/s00603-015-0803-1.

Mentani A, Govoni L, Gottardi G, Lambert S, Bourrier F, Toe D (2016b) A New Approach to Evaluate the Effectiveness of Rockfall Barriers. Procedia Eng 158: 398-403. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.462.

Moon T, Oh J, Mun B (2014) Practical design of rockfall catchfence at urban area from a numerical analysis approach. Eng Geol, 172: 41-56. DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.01.004.

Moreillon A (2006). European Patent No. 1 156 158 B1. Lausanne. Switzerland.

Moon T, Oh J, Mun B (2014) Practical design of rockfall catchfence at urban area from a numerical analysis approach. Eng Geol, 172, pp. 41-56. DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.01.004.

NFP 95 308:1996. Rock Falling Protection Equipment - Net Trap. AFNOR. France.

Nicot F, Cambou B, Mazzoleni G (2001) Design of rockfall restraining nets from a discrete element modelling. Rock Mech Rock Eng, 34 (2): 99-118. DOI: 10.1007/s006030170017.

Nicot F, Cambou B, Mazzoleni G (2001) From a constitutive modelling of metallic rings to the design of rockfall restraining nets. Int J Numer Anal Met, 25 (1): 49-70. DOI: 10.1002/1096-9853(200101)25:1<49::AID-NAG117>3.0.CO; 2-N.

Peila D, Pelizza S, Sassudelli F (1998). Evaluation of behaviour of rockfall restraining nets by full scale tests. Rock Mech Rock Eng, 31(1): 1-24. DOI: 10.1007/s006030050006

Peila D, Ronco C (2009) Technical Note: Design of rockfall net fences and the new ETAG 027 European guideline. Nat Hazards Earth Syst Sci, 9 (4): 1291-1298. DOI: 10.5194/nhess-9-1291-2009

Smith D, Duffy J (1990). Field test and evaluation of rockfall restraining nets, final report. California Department of Transportation Materials and Research. USA.

Spadari M, Giacomini A, Buzzi O, Hambleton JP (2012) Prediction of the bullet effect for rockfall barriers: a Scaling Approach. *Rock Mech Rock Eng*, 45:131–44. DOI: 10.1007/s00603-011-0203-0

Thomel L (1998). European Patent No. 0 877 1 22 A1. Juan les Pins. France.

Trad A (2011). *Analyse du Comportement et Modélisation de Structures Souples de Protection: le cas des Ecrans de Filets Pare-Pierres sous Sollicitations Statique et Dynamique*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

Trad A, Limam A, Bertrand D, Robit P (2013). Multi-scale analysis of an innovative flexible rockfall barrier. *Rockfall engineering*, pp. 303-342. DOI: 10.1002/9781118601532.ch9.

Tran PV, Maegawa K, Fukada S. (2013a) Prototype of a wire-rope rockfall protective fence developed with three-dimensional numerical modeling. *Comput Geotech*, 54: 84-93. DOI: 10.1016/j.compgeo.2013.06.008.

Tran PV, Maegawa K, Fukada S (2013b) Experiments and dynamic finite element analysis of a wire-rope rockfall protective fence. *Rock Mech Rock Eng*, 46 (5): 1183-1198. DOI: 10.1007/s00603-012-0340-0.

Trumer Schutzbauten GesmbH. Bending device, in particular cable bending device. Jager,D. Int. Cl.: B21D 11/07, n0 769858. 4 abril 2007

Turner, R.; Duffy, J.D.; Turner, J.P. (2009) Post Foundations for Flexible Rockfall Fences. In *Proceedings of the 60th Highway Geology Symposium*, Buffalo, NY, USA, 29 September–2 October 2009.

Volkwein A (2004) Numerical simulation of flexible rockfall protection systems. PhD thesis, ETH Zürich, Switzerland, 134 p (in German).

Volkwein A, Gerber W (2011a). Stronger and lighter - evolution of flexible rockfall protection systems. In: *IABSE-IASS 2011 London Symposium Report: Taller, Longer, Lighter. Meeting growing demand with limited resources. The 35th Annual Symposium of IABSE. The 52nd Annual Symposium of IASS and incorporating the 6th International Conference on Space Structures*. Zürich, IABSE. 5.

Volkwein A, Schellenberg K, Labiouse V, Agliardi F, Berger F, Bourrier F, Dorren L K A , Gerber W, Jaboyedo M (2011b) Rockfall characterisation and structural protection – A review. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 11: 2617-2651. DOI: 10.5194/nhess-11-2617-2011.

Xu H, Gentilini C, Yu Z, Qi X, Zhao S. (2018) An energy allocation based design approach for flexible rockfall protection barriers. *Eng Struct* 173: 831-852. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.07.018

Yu ZX, Qiao YK, Zhao L, Xu H, Zhao SC, Liu YP (2018) A simple analytical method for evaluation of flexible rockfall barrier. Part 1: working mechanism and analytical solution. *Adv Steel Constr* 14 (2): 115-141. DOI: 10.18057/IJASC.2018.14.2.1.

Thesis summary

**STUDY AND DESIGN OF A FLEXIBLE ROCKFALL
BARRIER USING EXPLICIT DYNAMIC MODELS IN
FEM SOFTWARE**

1 Thesis introduction

Falling rocks from unstable slopes generate quite dangerous situations, chiefly if they are close to a town or a road. That is why alternatives are constantly looked for in order to contain, control or reduce the speed of these blocks, which may reach considerable dimensions (Volkwein et al., 2011b, Chen et al., 2013).

One of the options consists on the implementation of flexible barriers. These elements have an impact area that somehow transmits the energy to the ground (Volkwein et al., 2011a). By definition, the system is light and slender; its most used materials are cable nets with diverse reticles. Some of the reasons why these systems are very demanded are the reduced amount of material to employ, the low visual impact, the ease and reduced setup time they need and the wide energy dissipation range they offer.

1.1 Background

The design of a flexible barrier demands a progressive process of selection of each of its components, as well as the analysis of the different variables that may have influence on their energy retention capacity. Finite and discrete element softwares are very useful tools, overall when dealing with such extremely large structures as those to be studied in this work, whose experimental tests imply such a high expenditure of money.

Only three works have been found that deal with the design of flexible barriers. Roberto Luis Fonseca and Luis Lopez Quijada developed their PhD theses (Fonseca R.L. 1995 and Lopez Quijada L. 2007) using analytical methods and static assumptions to calculate loads on flexible barriers and hence, make a dimensioning of its elements. Luis Lopez Quijada made a very simple static numerical model using software FEM in order to corroborate the analytical solutions, and also a dynamic model to find out the performance sequentiality. All the simplifications and static behaviour assumptions gave very conservative results. The third author, Xu et al. (2018), created a design methodology based on the percentage of energy absorbed by each element of the flexible barrier. However, this work is focused on one reference barrier, whose components are previously chosen. As it could be seen, all the design methods have some disadvantage to be solved.

Additionally, some of the components of these structures, namely, energy dissipators, sometimes present irregular performances, especially those whose main dissipation method is friction. In these cases, there is the uncertainty of not knowing exactly the load at which the system starts to work and, therefore, the amount of total energy the system may absorb.

This work is included in a project the group GITECO (Construction Technology Applied Research Group of the University of Cantabria) develops in collaboration with the company INCHALAM from Chile. The aim of this project is to create a low-medium energy barrier with the ultimate objective to compete with its main competitor, the company GeoBrugg, known at world level, and which until the moment has the monopoly in the implementation of flexible barriers both in Chile and in the world.

1.2 Objectives

The general objectives of this thesis are:

General objective 1. The design of a low-medium energy barrier.

General objective 2. Establish a design process for flexible barriers that optimizes materials in order to minimize its cost. To reach such aim, it is necessary to analyse of each of the components and the interaction between them.

To fulfill these general objectives, the following specific objectives are planned:

Specific objective 1. Revision of the marketed flexible barriers by other manufacturers. Analysis of components and assessment of their resistance separately and together forming a full complete barrier.

Specific objective 2. Use of numerical models of resolution able to face highly dynamic impact events that combine the 3 types of nonlinearities present in these problems: contact with friction, plasticity of materials and large deformations and displacements in the geometry.

Specific objective 3. Design of an energy-dissipating device, also called brake, whose main dissipation mechanism causes a regular performance curve and does not depend on the operator way of installation or external agents that damage the systems, like it happens in the greatest part of dissipators working by friction.

Specific objective 4. Study of parameters, mainly geometric, which could have influence on the energy retention of a barrier (that is to say, with the same components) and of which there is no information until date.

Specific objective 5. Analysis of the flexible barrier designed after performing experimental tests in order to achieve improvements and solve problems that may arise derived from its transport and installation. This aim may be reached thanks to the help of the company that carries out the tests, the manufacturer of the barrier, operators and installators.

2 State of the art

2.1 Parts of a flexible barrier

Flexible barriers are made up of an interception structure, a support structure and connection elements (ETAG 027). Each of these parts is subdivided in the different elements shown in Figure 1.

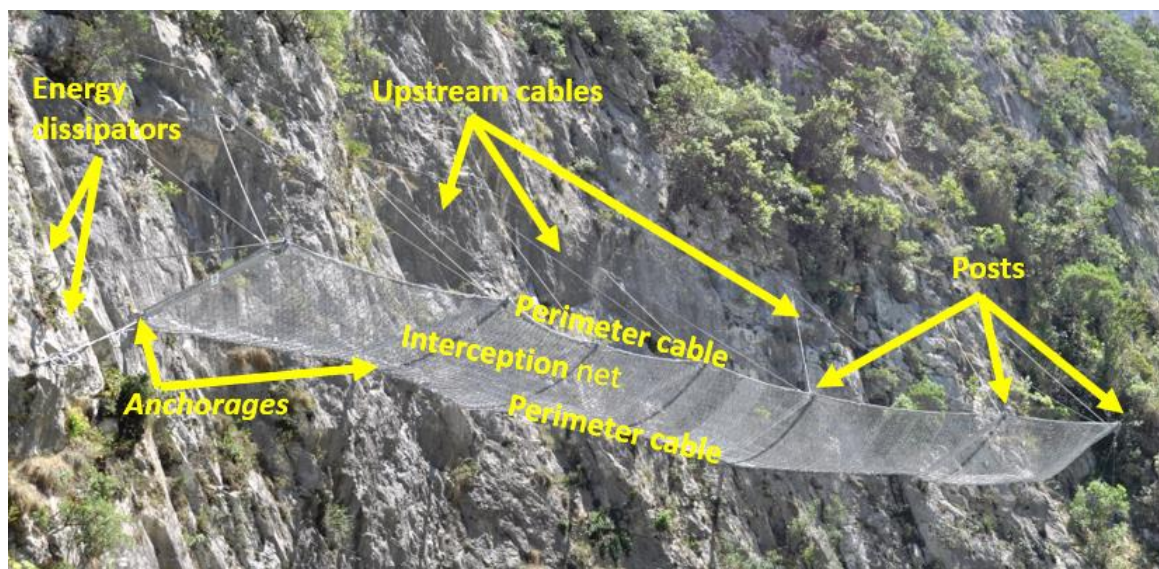


Figure 1. Main parts of a flexible barrier.

The interception structure function is to bear the direct impact of the rock. There are different geometries for the main interception layer. Square cable net, ring net, GTS cable net and Omega net are the main nets used for this aim, as shown in Figure 2.

To keep the interception structure upright a support structure is needed, so that posts of different materials, geometries and lengths are used.

The connection components transmit the stresses to the foundation structure during impact and/or maintain the interception structure in position. Some connection components are sewing cables or fixation pieces, perimetral cables, lateral and upstream cables, energy dissipating devices and cable ties.

The sewing cables or fixation pieces like shackles are the elements that keep the interception net and the perimetral cables together.

Perimetral cables are placed in the upper and lower outline of the interception net. The posts guide the perimetral cables to keep the net upright and with the maximum exposed area, and transmit the loads coming from the net to the posts.



Figure 2. Different geometries of the interception nets: a) square net, b) ring net, c) net GTS y d) net OMEGA

Side cables are the extension of the perimetral cables, from the end of the interception net up to its anchoring in the ground. In case the posts are not stuck in the ground, the additional installation of upstream cables is necessary to keep the posts in the right position, allowing them to receive and transmit the vertical responses to the ground.

In high energy level barriers, energy dissipating devices –also called brakes- are added in these cables. These mechanisms are included in the dynamic barriers to absorb part of the energy caused by the impact of the rocks on them, helping to reduce tensions in the structure (Castanon-Jano et al., 2017). They transform both kinetic and potential energy of the materials that impact in deformation energy, fracture or heat generated by friction.

Finally, the base plates or alternative pieces of fixation have as objective the connection of the posts to the ground.

2.2 Characterisation of components.

- **Tests in the cables:** The characteristic curve of each type of cable is obtained by performing tensile tests on them (Castro-Fresno et al., 2008). The resulting performance curves will be of great importance in the generation of numerical models, and will be defined in the next sections.
- **Tests in the interception nets:** They may be in static or in dynamic conditions. Concerning the static tests, there are 3 types: lateral tensile test, punching test and distributed load test. The boundary conditions, direction and way of load can be seen in Figure 3 a, b and c. On its turn, the dynamic tests consist on the impact of a concrete block, which may fall from some height, on the net. Controlling the height and the block mass the impact energy is determined (Figure 3d).
- **Tests in the brakes:** Among all the standards, only ETAG 027 (EOTA 2008) provides recommendations for the brake test. It suggests the performance of quasi-static test on the tensile machine, fixing one of the ends of the brake cables to one of the clamps, exerting the tensile load on the other end of the cable with a test speed of 2mm /s, and admitting a maximal elongation of 1m. This value of maximum elongation is the only restriction of design and is fixed to limit the maximal elongation of the barrier and avoid an excessive invasion on the area to protect. Apart from the static tests, dynamic tests are also carried out. The most used setup consists in fixing one of the ends of the brake cable to a fixed point, which is located at a specific height. The other end is fixed to a block, which falls freely. Selecting the height and weight of the block the energy applied to the system and that the brake must absorb is controlled.

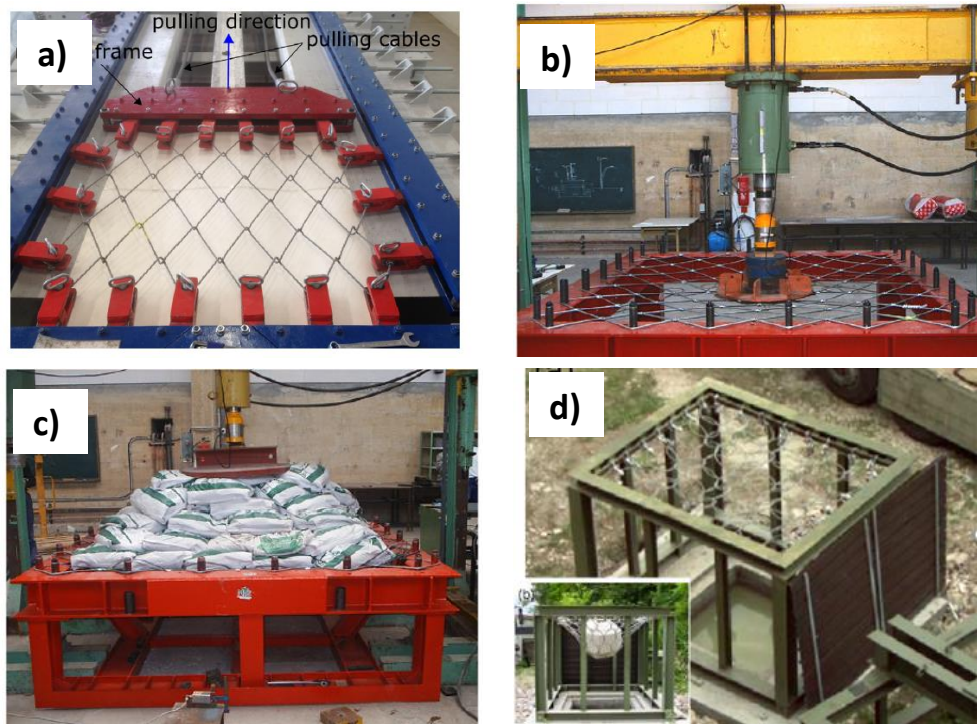


Figure 3. Tests on interception nets: a) lateral tensile (Escallón et al., 2015) b) punching (Castro-Fresno et al., 2008), c) distributed load (Castro-Fresno et al., 2008) and d) dynamic (Gentilini et al., 2013)

2.3 Aptitude guidelines

The most relevant document is ETAG027 "Guideline for European Technical Approval", published by the EOTA (European Organisation for Technical Assessment) and the technical note elaborated by Peila et al., 2009, related to such norm. ETAG027 is a document that offers guidelines for the approval of barriers through the performance of field tests, and it is the most used by all the barrier manufacturers since it is the only accepted as basis for the achievement of the logo EC.

According to this guide, the test consists on throwing blocks to the barrier (also called kit), measuring the speed of the block before the impact, determining then its impact energy, which corresponds to its kinetic energy.

Three sequential impacts are carried out with two different energy levels: Service Energy Level (SEL), with which the kit resistance to sequential impacts is verified and Maximum Energy Level (MEL), whose energy value is triple the SEL and whose objective is the characterisation of the maximal capacity with an only block impact.

The most important criterion among all the defined by the guide to pass both tests is that the block is stopped by the kit, independently from breakages in some of the elements conforming it.

2.4 Numerical models of resolution

There are two main numerical methods for the resolution of this type of dynamic problems: discrete element method (DEM) and the finite element method (FEM).

The discrete element method (DEM) is a numerical model used to describe the mechanical performance of the discontinuous bodies (Cundall and Strack 1979). The models are composed by a group of particles that interact among each other, being defined by their contacts and interactions.

Unlike the previous one, the finite element method (FEM) provides an approximate numerical solution of the differential equations that define the problem. The FEM is based on the transformation of a continuous media with infinite degrees of freedom in little parts called elements, which turn them into a discrete problem with finite degrees of freedom. Such transformation is called "discretization". The development of flexible barriers models by this numerical technique has been a method with a longer track record than that of modelisation with discrete elements (DEM).

2.5 Design methodologies

As mentioned in Section 1, there are mainly three works dealing with the design of flexible barriers.

- Roberto Luis Fonseca: design by breakage deformation. It is a static method that uses the results of experimental tests on membranes, brakes and cables to create a configuration of the deformed state from which the loads on the elements are calculated, and finally, the energy capacity of the barrier.
- Luis Lopez Quijada: modified design by breakage deformation, using this method in the inverted way; that is, choosing an energy for the barrier and going backwards. He was helped by a simplified static FEM model and dynamic FEM model to find out the sequentiality of performance.
- Xu et al: Using explicit FEM method, numerous models were calculated to find out the level of energy absorbed for each component in different situations. This information was then used to design a barrier with a specific level of energy.

2.6 Initial decisions and conclusions

- Improvements from the state of the art:
 - It is proposed to develop a new energy dissipator (aka brake) that reduces the uncertainties, giving a regular behaviour in its Force-displacement curves.
 - Considering section 2.5, the Design of Experiments (DOE) is selected as a method to reach an optimal dimensioning, since it has not been used for this aim before.
- Experimental tests:

Tension and punching tests will be used as reference tests to develop a FEM model and design a new barrier. These tests are chosen because they reproduce the real behaviour of the membrane when the impact occurs. In the central module, the membrane shape and deformation can be compared with that of the punching test. In the lateral modules a lateral extension in the plane of the membrane takes place, like that of the lateral tests. Distributed load tests are discarded, since they are more suitable to reproduce membranes anchored to a slope.

- Numerical methods:

In the development of this thesis finite element software will be used to carry out all the models, specifically ABAQUS to realise dynamic models of complete barrier and to study interception nets and ANSYS to study the energy dissipator, anchor plates and posts.

3 Study of the interception nets

The main objective consists on finding a new net that has not been used until the moment, with a resistance that makes it possible to design a low-medium energy barrier. For this reason, the interception structures that are proposed in this thesis have never been used for such end.

3.1 General description of the alternatives

The alternatives presented in this work for their use as interception net are two. The first one is the triangle net. It is a design proposed by GITECO, which starts from the square cable net of 200x200 mm, to which a cable is added that divides diagonally each of the squares, obtaining a net formed by identical isosceles triangles, whose smaller sides have 200mm and whose bigger side is 282,84mm. For a right fixation in the cables intersection by using with clips, it is established that the optimal diameter of the cables is 6mm, being of the type 7x19. The other interception

structure option proposed is the wire mesh MT1500. INCHALAM S.L., company from where this project arises, manufactures and markets this net. The resistance of the wire is between 13 and 14 kN with an average strain of 8.8%.

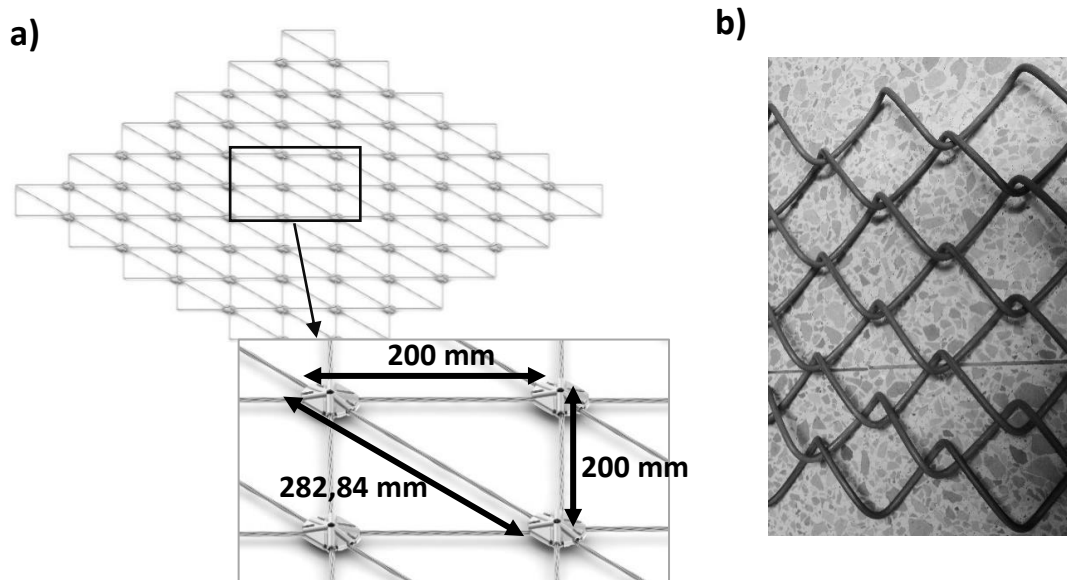


Figure 4. Alternatives studied as likely interception nets a) triangular net and b) wire mesh MT15000

3.2 Numerical simulation and calibration of the alternatives

Numerical models are developed using the finite elements software ABAQUS CAE.

3.2.1 Triangular net

There are not experimental tests for this type of net to which refer to make the calibration. The numerical models created to reproduce the performance of the triangular barriers are carried out starting from unidimensional elements without bending stiffness, similarly to the square nets shown and calibrated in the works carried out by Gentilini et al, 2012 and Castro-Fresno et al., 2008. The material will have a multilinear tension deformation elasto plastic law obtained from tensile tests of the cables.

3.2.2 Wire mesh MT15000

Its calibration was reached using the results of the lateral tensile tests and the punching tests. Several models were implemented using different types of elements before reaching the final model.

The solution was found including bar elements without bending stiffness (truss) and arranging them in a rhomboidal barrier, with the aim to recreate the shape and location of each mesh wire. To carry out the wire mesh calibration laws of 3 types -linear, bilinear and thrilinear- were tested and the error committed at the end of both tests of the curves load-displacement was assessed, limiting the mentioned error to a maximum of 10%. The law of the material that offers best results is a bilinear law with the parameters of Table 1. The experimental and numerical curves with the best fitting are observed in Figure 5, where a great agreement is observed in both tests.

Table 1. Parameters of the material used in the calibration of the mesh MT15000.

| ε_1 (-) | σ_1 (MPa) | ε_2 (-) | σ_2 (MPa) | ε_3 (-) | σ_3 (MPa) | $\varepsilon_4 = \varepsilon_s^p$ (-) | σ_4 (MPa) | u_f (m) |
|---------------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------------------------|------------------|-----------|
| 0 | 0 | 0.00001 | 1 | 0.08962 | 200 | 0.1398 | 627.9 | 0.000001 |

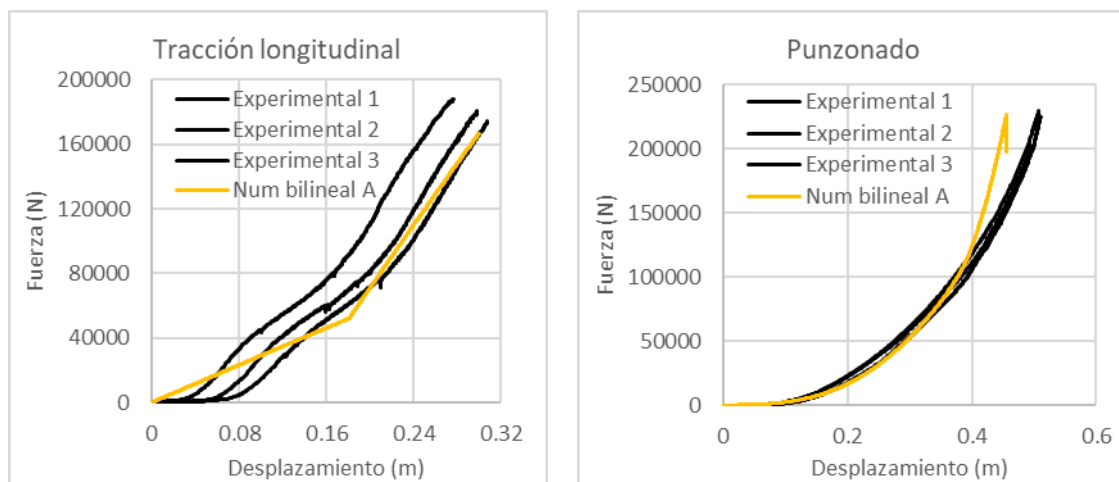


Figure 5. Graphs comparing Force-Displacement in the wire mesh MT15000 coming from the experimental tests vs. numerical simulation a) lateral tensile test, and b) punching test with circular plate

3.3 Analysis of one functional module

As a previous step of the analysis of the nets on the full barrier, only one functional module of 10x3 mts is analysed by impacting it with a spherical block of 500 kg and density of 2500 kg/m³. The models are composed by two perimetral cables and the different alternatives of the interception structure:

- Triangular cable net with cables perpendicular to the perimeter cables (orientation O1)
- Triangular cable net with cables parallel to the perimeter cables (orientation O2)
- Wire mesh MT15000
- To make a comparison with some of the meshes found in the literature and already used in block retention, a model MEF has been implemented of square cable mesh of 8mm of diameter.

Two different connection types between the perimetral cable and the net (or mesh) are implemented. The model for triangular cable net O1 and the boundary conditions in both connection configurations are detailed in Figure 6. With the aim to find the maximal energy able to absorb the functional module without breaking, the initial speed of the block is varied, with increments of 0.1m/s, until the initial speed which the mesh is unable to bear the impact is found.

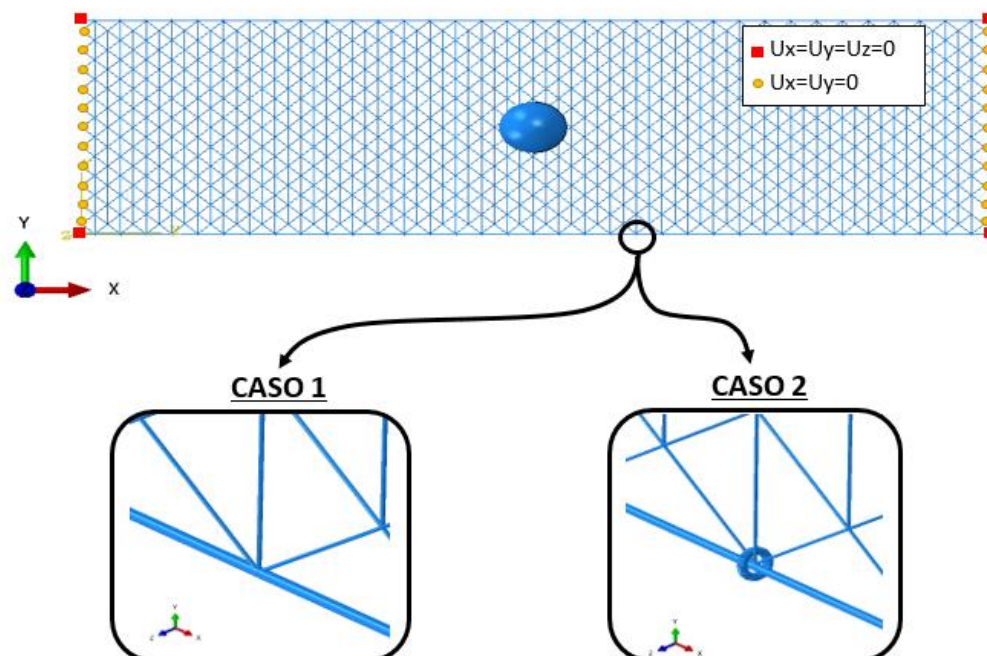


Figure 6. Boundary conditions in the extremes and the joint perimetral cable-net of the model of one functional module. In case 1 the fixed joint is represented between the net and the perimetral, while in case 2 the joint is reached by shackles.

The joint between the net (or mesh) and the perimetral cables by shackles (Case 2) use 4 different friction coefficients, between 0.6 and 0. This research is compulsory, since we must consider that the connection between the membrane and the perimeter cables is simplified with the shackles, so the usual friction coefficient steel-steel could not be of application in this case. In consequence, it is of great usefulness to find out the differences between models with different connection features.

The results of the energy absorbed by unit of mass (Figure 7) show that the joint with friction between the perimetral cables and the net or mesh significantly increases the maximal energy per mass able to retain respect those cases of fixed joint (Case 1), both in square net, the triangular net with orientation O1 and the MT15000. The maximal percentage of this energy increase is 153%, 100% and 65%, respectively. This tendency is directly related with the boundary conditions liberation, that allows a higher sliding of the nets and hence, a higher elongation on the impact.

However, the triangular net O2 does not suffer the same trend, but the variation of the type of perimetral joint and contact without friction is practically irrelevant from the results of energy per mass obtained. This behaviour is due to the low influence of the perimeter cables in the absorption energy, since the triangular net is unable to slide through them because of the limitations caused by the geometry.

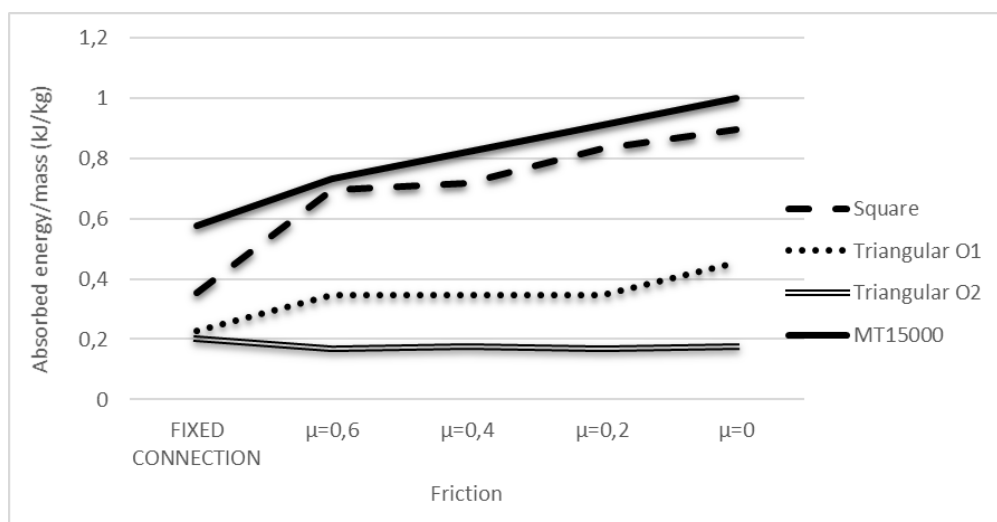


Figure 7. Graph of energy absorbed by a functional module in relation to the type of joint and friction between the perimetral cables and the net or mesh.

Besides, it can be noticed that, for triangular cable nets, there is almost no variation of absorbed energy per unit of mass when the friction coefficient is varied between 0.2 and fixed joint, unlike

what happens in the wire mesh MT15000, the square net and the triangular net, where there is a progressive increase of the absorbed energy per mass as the friction coefficient is reduced.

It can be concluded that the triangulation of a square net does not give good results but reduces and even limits the ability to deform and slide against the perimeter cables.

3.4 Analysis of a complete barrier

The implementation of a complete barrier starts from the calibration of a reference model, which helps us to verify that the models derived from it will be valid. For this, the data of two dynamic barriers IBT-150 and IBT-500, with 150 kJ and 500 kJ of capacity, respectively, will be used.

3.4.1 Calibration of two flexible barriers IBT150 and IBT500

The geometry, components and location of sensors of both barriers are detailed in Figure 8.

The tests are performed with a vertical drop type. In the barrier IBT150 the energies SEL and MEL applied by the block impact are of 50 and 165kJ, respectively, while in the barrier IBT500 they are 167 and 521kJ. These energies are achieved by the control of the height and the mass of the impact blocks.

The following data is recorded in each test: block velocity in the last meter before the impact, maximum elongation, residual height of the net and forces in cables and anchors. 16 sensors have been installed, based on the electrical extensometry technology (Figure 8). High-speed cameras recorded the tests from a frontal and lateral view.

Both barriers surpassed the criteria established by ETAG027, not only for the service energy but also for the maximal energy.

For the purposes of calibration of the numerical models for the experimental tests only the data of the sensors located on the left of the barrier are used, because the sensors placed on symmetrical positions show similar records strength vs. time.

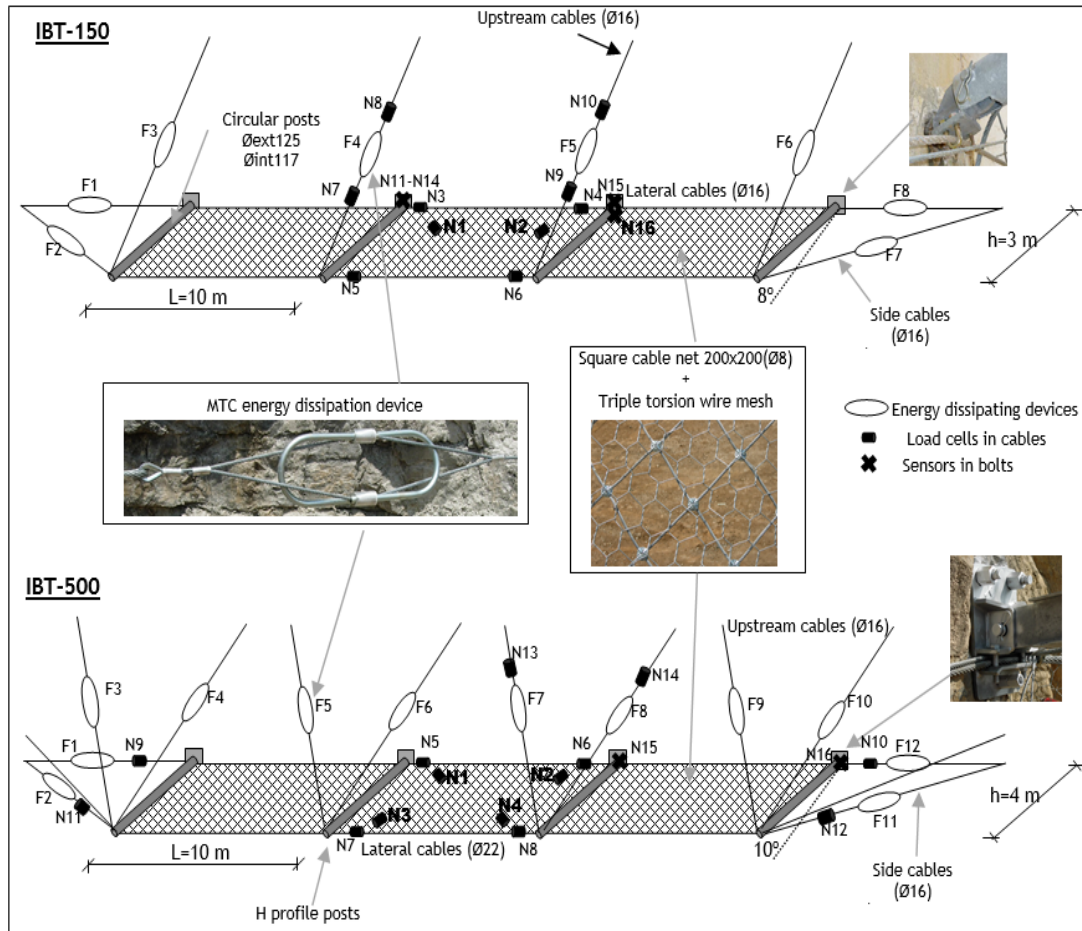


Figure 8. Geometry of the barriers IBT150 and IBT500 and location of the sensors.

The main characteristics of the model are summarised here:

- Cables are simulated by unidimensional elements without bending stiffness (truss). A multilinear elasto plastic law is included in the material properties.
- The energy dissipator elements are simplified using axial connectors with the law load-displacement of the brakes 140 tightening bar (Lopez Quijada 2007).
- The posts were simulated using beam type elements with bending stiffness, giving in each case their real profile.
- The connection between the posts of the ends and the sides of the cable net is carried out coupling their degrees of freedom.
- Circular rings of “shackles” connect each one of the squares of the outline with the corresponding perimetral cable.

- The friction coefficient values that best help to reproduce the interactions in the model are: $\mu=0.4$ for the interaction block-mesh; $\mu=0.4$ for the interaction perimetral cables-sewing shackle and $\mu=0.2$ for the interaction between perimetral cables-guided shackles joint to the posts.

Due to the difficulties in the model related to the contacts in successive impacts, the second impact SEL was not analysed and the impact MEL was simulated with an intact new bar, non-deformed.

In general, a good agreement is observed between the strength records of the experimental tests with respect to the numerical records (Figure 9 to Figure 12).

In both barriers the maximal elongation was only compared in the first impact with service energy (SEL), since the test with maximal energy is affected by the permanent deformation induced by the previous SEL tests. The results show a maximum dispersion between the experimental tests and the numerical models of 8%.

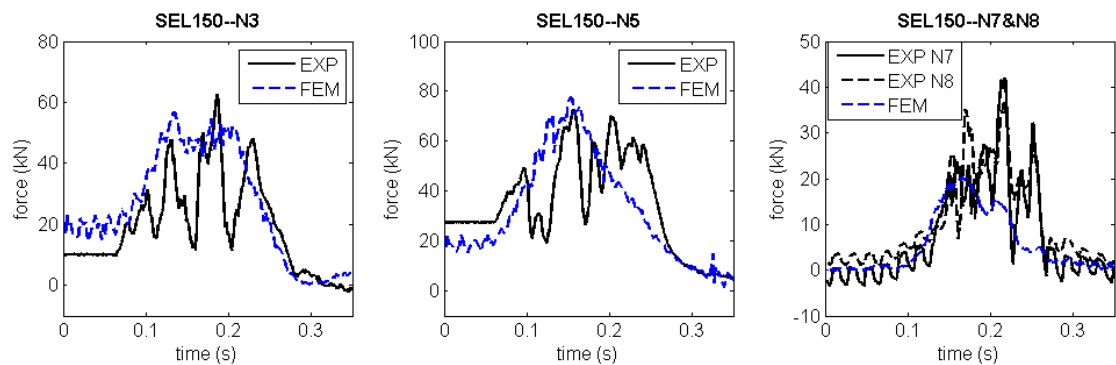


Figure 9. Graphs Load-Time of the 1º test SEL in the barrier IBT-150. Comparison between experimental tests and numerical simulation.

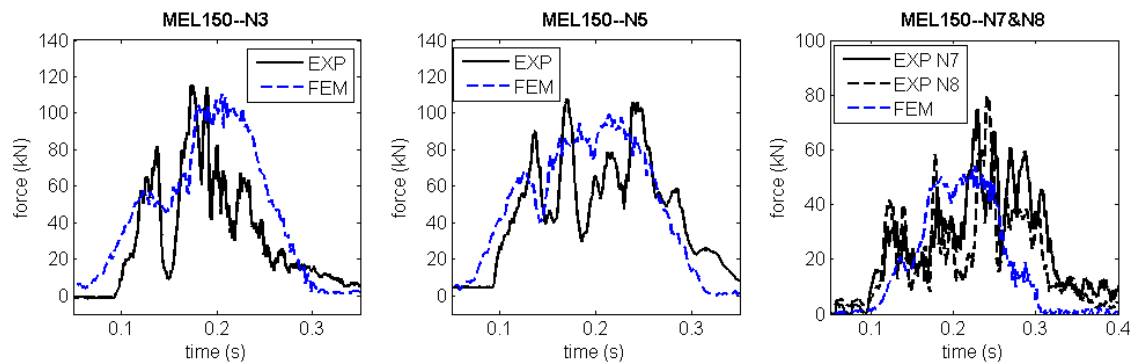


Figure 10. Graphs Load-Time of the test MEL in the barrier IBT-150. Comparison between experimental tests and numerical simulation.

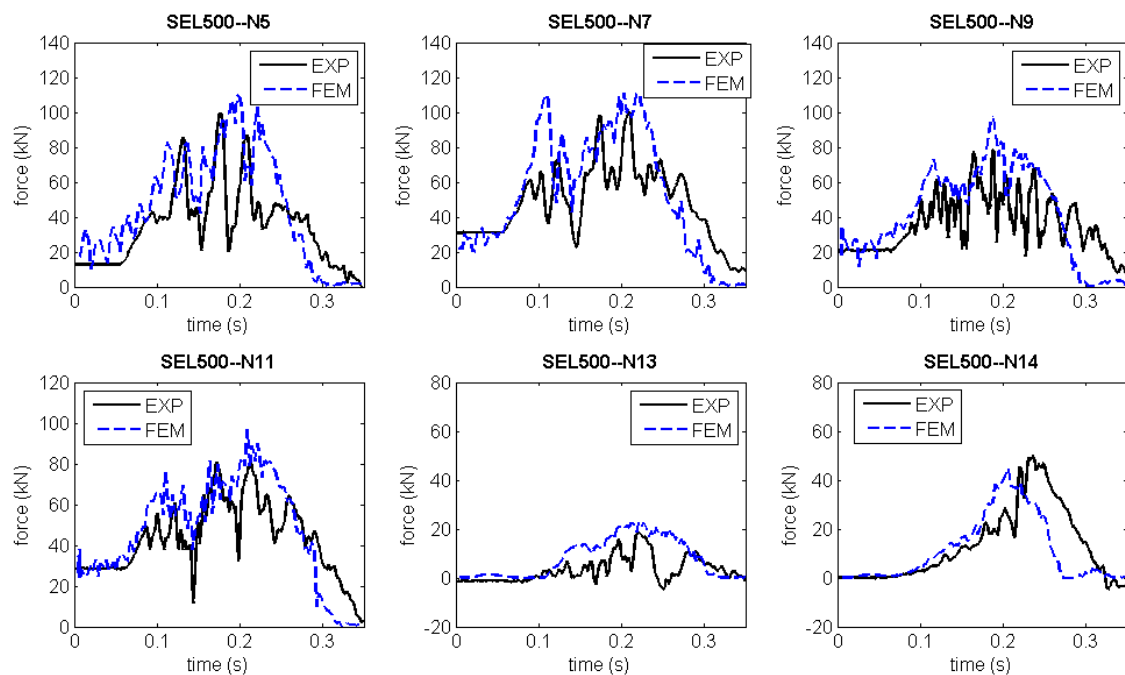


Figure 11. Graphs Load-Time of the 1° test SEL in the barrier IBT-500. Comparison between the experimental tests and the numerical simulation.

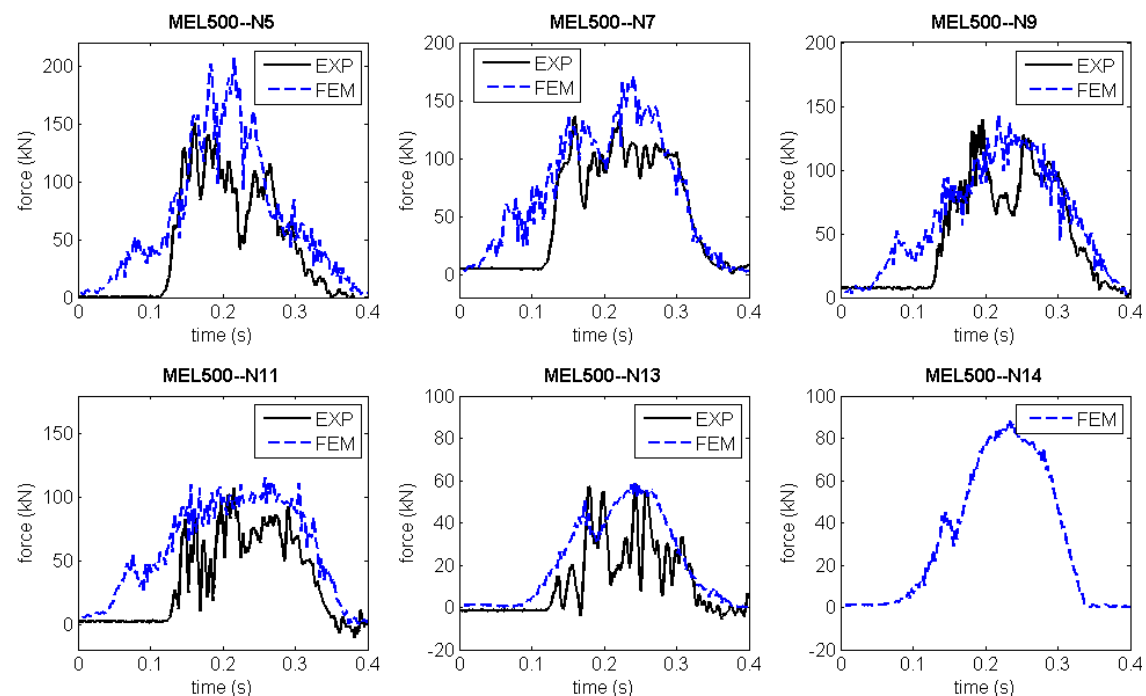


Figure 12. Graphs Load-Time of the test MEL in the barrier IBT-500. Comparison between the experimental tests and the numerical simulation.

3.4.2 Extrapolation of the reference models

To study the performance of the meshes with the most real boundary conditions, the structure of barrier IBT150, already calibrated, was used as reference model over which the modifications for each type of mesh will be made. This means that the structure made of posts, upstream and side cables, and perimetral cables are kept, and on these the three different interception nets -square, triangular in the two orientations and MT15000- are set up. The only element which disappears respect the IBT150 are the brakes, because the aim of this section is to study the energy absorption by the mesh being it preferable to remove the influence of these devices in the response of the meshes due to the impact.

In the triangular nets in both orientations and the square net, the connection between each reticle of the mesh and the perimetral cable arranges similarly to those of the barriers IBT150 and IBT500. However, due to limiting factors in the design, it is impossible to carry out the connection between the perimetral and the mesh MT15000 in the same setup; therefore, it is carried out as it is shown in Figure 13.

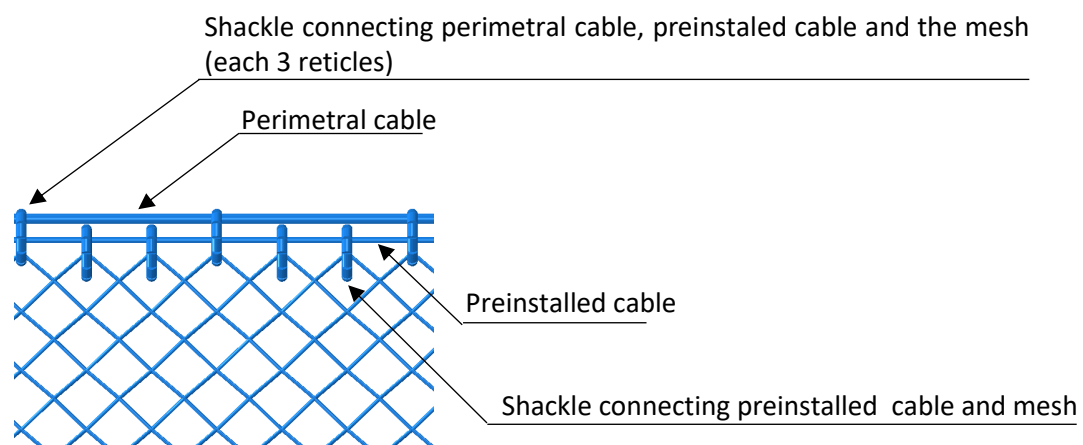


Figure 13. Geometry introduced in the software Abaqus for the fixation of the mesh with the perimetral cable used using circular shackles.

The graph in Figure 14 shows the energy retention capacity of the meshes for the four blocks used in the study, of mass 500, 750, 1000 and 1250kg.

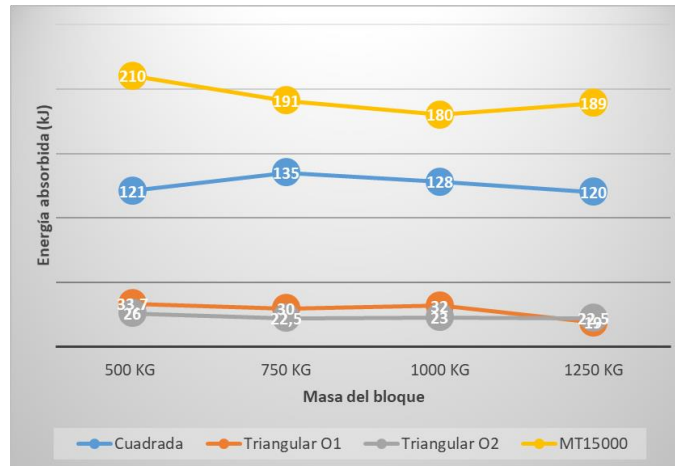


Figure 14. Energy capacity of the barriers with different meshes in relation with the mass and; therefore, size of the block.

As it can be seen, there is no dependency of the energy the barrier can bear for each type of mesh or net in relation to the size and mass of the block, but it is practically constant in all the cases. The maximum difference is of 30 kJ in the case of the mesh MT15000. The mesh that most kinetic energy can bear is the wire mesh MT15000, with an average value of 192.5 kJ 52,8% higher than the square cable mesh, and between 6 and 8 times more than the triangular nets.

From the point of view of the barrier's manufacturer, it is important to relate the energy a barrier is able to absorb with another parameter related to its cost. For this, an efficiency parameter is considered, and it is calculated as the maximal energetic capacity of the divided barrier by the mesh or net mesh (directly related to the cost).

Table 2. Efficiency of the meshes studied related to its mass

| | Mass (kg/m ²) | Net total mass (kg) | Average energy (kJ) | Energy/mass (kJ/kg) |
|-------------------------------------|------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| MT15000 | 5.5 | 495 | 190.25 | 0.384 |
| Square net | 3.8 | 342 | 126 | 0.368 |
| Square net + triple torsion mesh | 5.15 | 463.5 | 126 | 0.272 |
| Triangular net O1 | 2.64 | 237.6 | 28.675 | 0.121 |
| Triangular net O2 | 2.64 | 237.6 | 23.5 | 0.099 |

The results show that the mesh MT15000, apart from absorbing the highest impact energy in absolute terms, is the best option if attending to its efficiency (Table 2). MT15000 is able to absorb 0.384kJ/kg, whilst the square mesh, which is being used as reference in this work, resists

0.368kJ/kg. The difference between these two values increases significantly if the triple torsion mesh is considered that is necessary to additionally set up to the square mesh to stop the fall of small rocks. If so, the efficiency of the group turns out to be 30% smaller than the MT15000. Consequently, the mesh MT15000 has been selected for its inclusion in the design of the dynamic barrier object of study of this work.

4 Design of energy dissipating device

The design is focused on a new energy dissipation system based on the energy absorption by deformation of its components (Figure 15). A series of hollow profiles are arranged one after the other and are closed between 2 metallic plugs. The cables are introduced by the holes from opposing ends and in opposite directions. At the free ends of the cables, one or several consecutive aluminium shells are included, to which pressure is applied leaving them fixed to the cable without any chance to displace.

When a rock falls into a barrier, the load transmission makes the plugs press against the profiles provoking the squashing of the tubes, process by which they absorb a great amount of energy, protecting, in this way, the barrier integrity.



Figure 15. Prototype of dissipator by deformation.

4.1 Experimental campaign

4.1.1 Dynamic tests

The performance of a dynamic test comes determined by the need to bring the brake closer to its real conditions. The type of dynamic test carried out is the first of the dynamic tests described in the characterisation of components section in the state of the art (Bertrand et al., 2012; Trad et al., 2013).

Four types of brakes are tested in which the number of tubes and their dimensions are varied. The energy applied in the impact is selected from the initial and simplified numerical simulations. All the geometrical properties and the results are detailed in Table 3.

After the dynamic tests, the brake tubes did not squash completely but from the total of energy applied to the test, the plastic deformation of the tubes only comprises between 25 and 67%. The rest of the energy corresponds to the energy by elastic deformation of the cables, frictions in the arrangement of the cables and the cable ties, and the cables friction with the upper and lower square plates due to the eccentricity of the device.

Table 3. Dynamic tests performed on brakes at scale.

| | Nº test | Energy applied to test (kJ) | Energy absorbed by the brake (kJ) | E_{abs}/E_{apli} |
|---|---------|-----------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| <u>BRAKE 1</u> 2 tubes $\phi_{ext} = 101.6 \text{ mm}$ $thickness = 5 \text{ mm}$ | 1 | 5.4 | - | - |
| | 2 | 5.4 | 1.990 | 0.368 |
| | 3 | 5.4 | 2.368 | 0.430 |
| <u>BRAKE 2</u> 2 tubes $\phi_{ext} = 101.6 \text{ mm}$ $thickness = 6.3 \text{ mm}$ | 4 | 7.5 | 2.535 | 0.330 |
| | 5 | 7.5 | 1.937 | 0.258 |
| | 6 | 7.5 | 2.943 | 0.392 |
| <u>BRAKE 3</u> 3 tubes $\phi_{ext} = 101.6 \text{ mm}$ $thickness = 5 \text{ mm}$ | 7 | 8.3 | 5.618 | 0.676 |
| | 8 | 8.3 | 4.743 | 0.571 |
| | 9 | 8.3 | 4.422 | 0.532 |
| <u>BRAKE 4</u> 3 tubes $\phi_{ext} = 101.6 \text{ mm}$ $thickness = 6.3 \text{ mm}$ | 10 | 12.5 | 6.042 | 0.483 |
| | 11 | 12.5 | 5.816 | 0.465 |
| | 12 | 12.5 | 7.102 | 0.568 |

4.1.2 Static tests

The performance of dynamic tests showed the existence of multiple variables difficult to control. These are the friction of the sling with the horizontal beam, the rebound of the weight after the first impact, the friction of cables with the upper and lower brake plate, etc.

With the aim to get rid of all these uncertainties it is decided to carry out static tensile tests over a prototype of brake with 2 tubes of outer diameter 101.6 mm and thickness 5mm (brake type 1 attending to the terminology of the dynamic tests). Secondly static tensile tests to the cable of diameter 16 will be performed; and, to complete the characterization, compression tests of the tubes used in the brake, of outer diameter 101.6 mm and thickness 5mm (Figure 16).

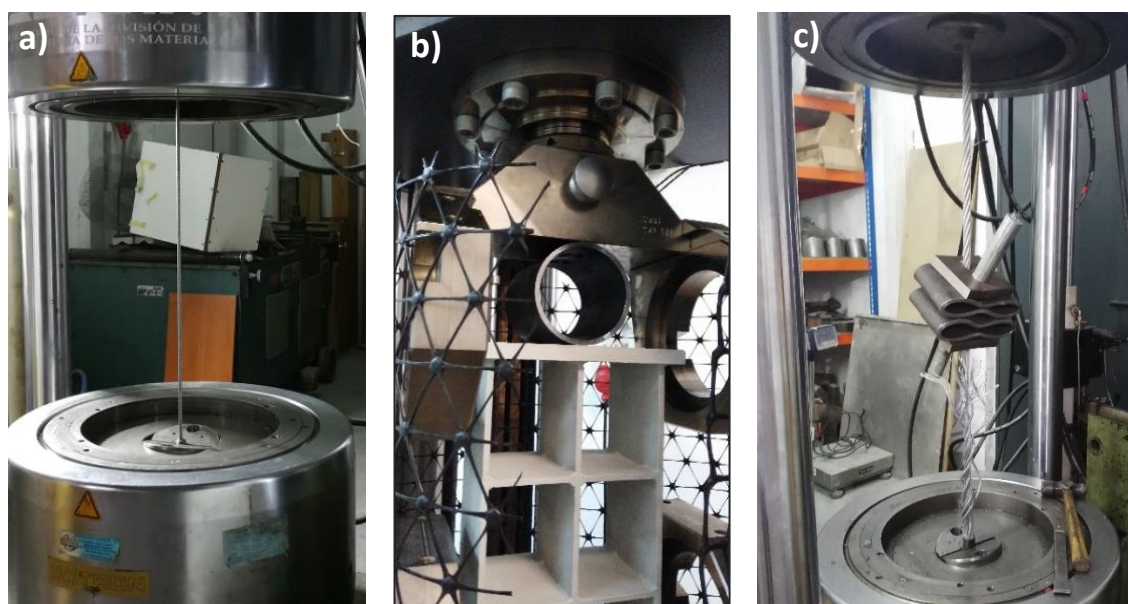


Figure 16. Static tests a) tensile to cable diameter 16 mm, b) tube compression and c) tensile to brake of 2 tubes.

For the three components the absorbed energy is calculated (Table 4), value obtained from integrating the resulting graphs of load vs. displacement of the machine. In this way, it is possible to obtain the energy decomposition for each element and dissipation mechanism. The value of energy dissipation by friction of the components is obtained by the difference of total energy of the brake and the deformation energies of the components (cable and tube).

Table 4. Summary of the decomposition of the energy absorbed by the brake in each of its components: deformation of tubes, deformation of the cables and friction sheets-cables.

| | Energy absorbed (kJ) |
|------------------------|------------------------|
| Total in the Brake | 11.63 |
| Deformation 2 tubes | $2 \times 2.57 = 5.14$ |
| Deformation Cables | 2.23 |
| Friction sheets-cables | 4.26 |

With all the tests and the analysis of energy absorption carried out the following observations are made, which will help to more accurately define the finite element models:

Observation nº 1: The static test of the brakes with tubes of 101.6mm and 5mm of thickness does not show an optimal performance. The brake activates at low load and the tube deformation is very quickly completed, because the increase of length of the brake in the last part is mainly caused by the cable deformation until break

Observation nº2: The friction of the edges of the holes with the cables causes the break of some wire on the brakes before it would normally do and causing its premature break.

Observation nº3: Although in the tests carried out to independent tubes cracks appear in both sides of the samples, this does not happen in the tests to the full brake.

4.2 Calibration of numerical models

The calibration of brakes was carried out by the previous static tests of their main components: cables of 16mm diameter and the tubes.

The cable was implemented by using tridimensional solid elements and an isotropic multilinear material law. The calibration was performed by the simulation of a tensile test and comparison with the experimental results.

In relation to the tubes, an isotropic bilinear isotropic model was used, whose elastic modulus, yield stress, ultimate strain and ultimate stress are those specified by the tubes supplier and correspond to material S355 J2.

Once separately calibrated both the cable and the tubes, these are included in a model of brake of 2 tubes of 101,6 mm and 5 mm thickness. The fitting between the experimental and numerical curves of load vs. displacement is very high, even in the last zone, in which the responses experimented by the brake are practically due to the cable resistance (Figure 17).

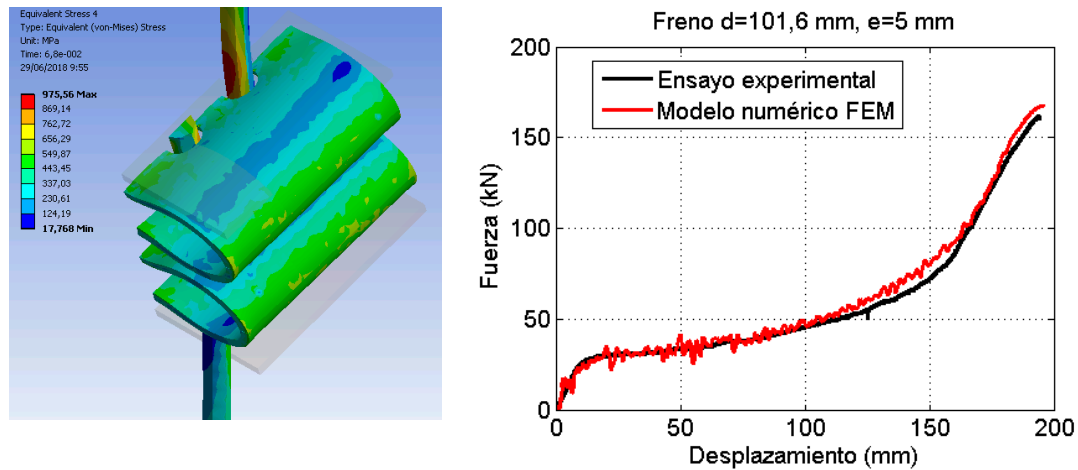


Figure 17. S A) Equivalent stress of the brake after loading. B) Graph Force-Displacement of a brake of 2 tubes of outside diameter 101,6mm and thickness 5mm. Comparison of the experimental test and simulation FEM.

4.3 Selection of final geometry

Using the calibrated model as a basis, three similar models are carried out, varying the tubes diameters and thicknesses. Model 1 has an outside diameter of 114,3mm and wall thickness of 6,3mm. Model 2 has an outside diameter of tube of 133mm and wall thickness of 8mm and the last model (Model 3) has the same outside diameter than model 2 and a wall thickness of 10mm.

Table 5. Dissipated energy obtained from the numerical simulations.

| | Energy 2 tubes (kJ) | Mass per meter of tube (kg/m) | Mass 2 tubes (kg) | Energy/Mass (kJ/kg) | Extrapolating energy 6 tubes (kJ) |
|---|---------------------|-------------------------------|-------------------|---------------------|-----------------------------------|
| Calibration model $d = 101.6 \text{ mm}$ $e = 5 \text{ mm}$ | 11.8 | 12.2 | 2.928 | 4.03 | 33.6 |
| Model 1 $d = 114.3 \text{ mm}$ $e = 6.3 \text{ mm}$ | 14.6 | 17.2 | 4.128 | 3.53 | 48 |
| Model 2 $d = 133 \text{ mm}$ $e = 8 \text{ mm}$ | 19.8 | 25.2 | 6.048 | 3.27 | 63 |
| Model 3 $d = 133 \text{ mm}$ $e = 10 \text{ mm}$ | 20.5 | 30.9 | 7.416 | 2.76 | 66 |

The three simulations gave the following results: the higher activation load is reached by the Model 3, followed by Model 2 and Model 1. Furthermore, Model 2 and 3 have the higher dissipation energy (Table 5). Despite the calibration model and the model 1 have the higher rates energy/mass, they have, in absolute terms, lower values of energy, and Model 2 and 3 are able to dissipate up to a 26% more energy than Model 1 and 2.

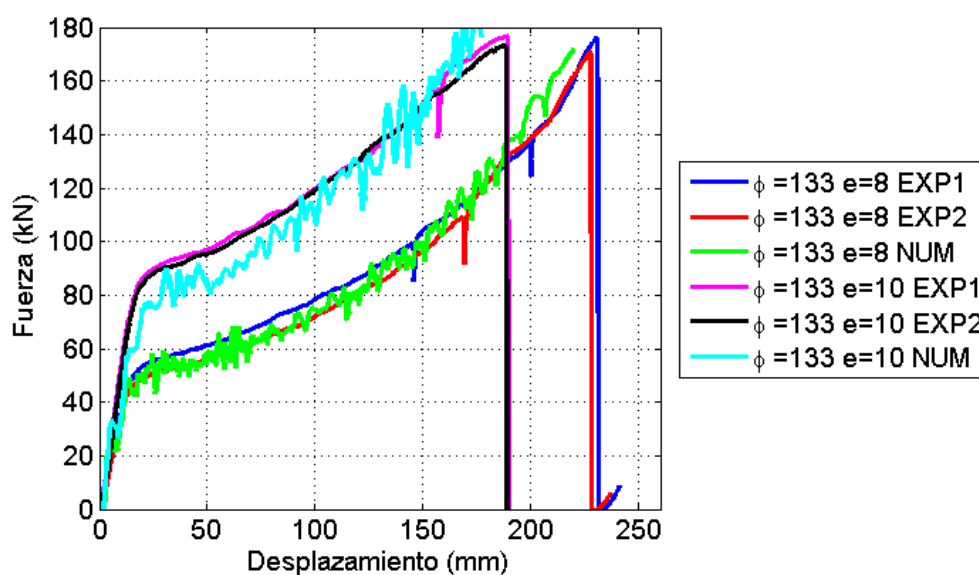


Figure 18. Graph Force-Displacement of the static test and comparison of the curves FEM of the 2 brakes.

To corroborate the simulations, Models 2 and 3, with a higher dissipation energy, were also analysed with static tests (Figure 18), since it is extremely difficult to numerically find out the instant of cable break. The reason is that, whilst in reality, the break is due to the wear of cable strands by friction, the numerical model is simplified as an only slim cylinder imitating the whole cable.

The brake break load is approximately the same (170-175kN) in model 2 and 3 (Figure 18). In the experimental tests performed to these two brake geometries there is little difference in the absorbed energies, being 20 and 21 kJ in the case of the tubes with 8 mm; and 21 and 22 kJ in the case of tubes with 10mm.

The decision of which brake will be chosen for its use in the final barrier will be taken depending on its efficiency by mass unit. Considering that mass of the tubes of diameter 8mm is of 25.2 kg/m

and of the tubes of 10mm of thickness is of 30.9kg/m, efficiencies of 3.5 and 2.83 kJ/kg are obtained, respectively. Besides, the static tests reveal that for the brakes with tubes of higher diameter the cable break is produced before the compression of the tubes is complete. In conclusion, the brake that will be used in the barrier design will have tubes of 133mm diameter and 8mm thickness.

5 Parametric analysis by DoE and dimensions selection

It is a common practice of barrier manufacturers to sell their products offering some geometrical variations with respect to the certified barrier, without taking into account that certain modifications may negatively affect their energetic capacity. The study of several parameters related to the barrier geometry and setup will help to understand the failure mechanisms of the barrier and the failure points (net, perimetral cables, posts, upstream or side cables, etc.). The models features needed for this study are determined using a method called DoE (Design of Experiments), a statistical method which helps to study the effect than a group of variables, called factors, may have on the response variable.

In this case, the response variable is the maximal energy that a barrier is able to absorb and the factors to analyse are the modules length, their width, the distance of unstitched around the post ends and the location and number of brakes. The brake curve and the diameter of the perimetral cables are factors which are been fixed in order not to exceed too much the number of tests to carry out; otherwise, the DoE would be non-viable. The brake curve is an extrapolation of the brake selected in the previous section for a brake with 6 tubes instead of 2, and the perimetral cables have a diameter of 16mm.

Each of the experiments is implemented in the software Abaqus. The models are performed similarly to those included in section 3.4.2, including the brakes as axial connectors where it is appropriate for each model.

The models' characteristics, as well as the maximal energetic capacity and the failure locations are defined in Table 6.

Table 6. Characteristics of the models created by DoE and results of maximal energy and location of the brake in the critical timestep.

| Order | Length | Width | Sewing | Location brake | Maximal energy (kJ) | Failure location |
|-------|--------|-------|--------|-----------------------------|---------------------|------------------------|
| 1 | 8 | 3 | 0.5 | Lateral and upstream cables | 331.3 | Mesh |
| 2 | 12 | 3 | 0.5 | Lateral and upstream cables | 499.6 | Mesh |
| 3 | 8 | 5 | 0.5 | Lateral and upstream cables | 427.6 | Preinstalled cable |
| 4 | 12 | 5 | 0.5 | Lateral and upstream cables | 622.5 | Preinstalled cable |
| 5 | 8 | 3 | 1 | Lateral and upstream cables | 393.6 | Mesh |
| 6 | 12 | 3 | 1 | Lateral and upstream cables | 533.6 | Mesh |
| 7 | 8 | 5 | 1 | Lateral and upstream cables | 575.7 | Preinstalled cable |
| 8 | 12 | 5 | 1 | Lateral and upstream cables | 622.5 | Lower perimetral cable |
| 9 | 8 | 3 | 0.5 | Lateral cables | 274.9 | Mesh |
| 10 | 12 | 3 | 0.5 | Lateral cables | 429.1 | Mesh |
| 11 | 8 | 5 | 0.5 | Lateral cables | 333.1 | Preinstalled cable |
| 12 | 12 | 5 | 0.5 | Lateral cables | 622.5 | Preinstalled cable |
| 13 | 8 | 3 | 1 | Lateral cables | 331.4 | Mesh |
| 14 | 12 | 3 | 1 | Lateral cables | 499.4 | Mesh |
| 15 | 8 | 5 | 1 | Lateral cables | 397 | Preinstalled cable |
| 16 | 12 | 5 | 1 | Lateral cables | 594.3 | Lower perimetral cable |
| 17 | 10 | 4 | 0.75 | Lateral and upstream cables | 484 | Preinstalled cable |
| 18 | 10 | 4 | 0.75 | Lateral cables | 466.4 | Mesh |

With these results, the second order regression equation is:

$$E_{max} = -497 + 66,3 LENGTH + 56,39 WITH + 420 SEWING - 111,0 BRAKES \\ - 31,8 LENGHT * SEWING + 8,09 LENGHT * BRAKES$$

$$R^2 = 94,81\%$$

$$R^2_{adjusted} = 91,97\%$$

$$R^2_{predictive} = 85,18\%$$

5.1 Determination of the final parameters of the barrier

Experimental tests of dynamic barriers are studied (Gentilini et al, 2012, Peila et al., 1998, Nicot et al., 2001, Moon et al., 2014) in a wide state of the art. All of them have something in common; the length of the functional modules is 10mts. With the aim to design experimental tests comparable to those already existing, the value of 10mts length as final value was established. The influence of the increase or decrease of the width of modules in barriers can be measured by the regression equation obtained in the DoE. What is found in the literature is a tendency to a wider width as its target energy is higher. This corroborates the presence of the width as influential factor in the regression equation obtained.

Using DoE it has been found out that the longer the unstitched length in the mesh respect the perimetral cable around the post ends, the higher the energy the mesh absorbs. Therefore, an unstitched distance of 1mt at both sides of the post ends will be used which will be tested later. It is possible that this distance is increased, although this will be limited by one of the necessary conditions to overcome the tests of service energy: after the first impact the mesh width must be higher than the residual height (ETAG027). For this reason, it is preferred to establish the mentioned distance of 1mt and observe the experimental results to determine if it is possible to increase this length even further. Finally, respect the brakes, they will be included in all the lateral and upstream cables to maximise the dissipative capacity respect this factor.

Applying the regression equation using the values of the parameters selected a maximal energy of the barrier is obtained of 523.66kJ. As R^2 predictive is 85.11% an error of 14.88% respect the calculated value is found; that is to say, there could be a deviation of ± 78.5 kJ.

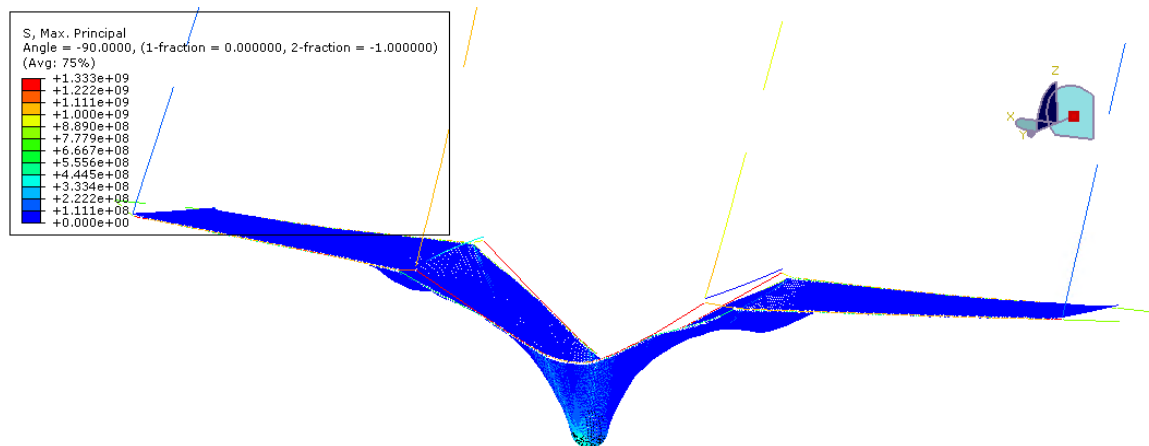


Figure 19. Model of complete barrier with the selected parameters. Moment of maximal elongation.

6 Design of the posts and anchor plates

With the aim to apply the loads to the post and the anchor plate in the most realistic way, the load values are extracted from the final model of barrier 10x4mts performed after the DoE on the previous chapter. These loads were measured in the 3 axis (x, y and z) of the perimetral cables of the central module, perimetral cable of the adjacent module and upstream cable, and both in the head and in the basis of the post. Also, the angles that the cables form with respect to the axis were needed. All the loads were extracted in instant of maximal elongation of the barrier.

6.1 Posts

The three versions shown in Figure 20 were considered. Version 1 was calculated with the HEB profile in two perpendicular orientations. The results of the Figure 21 show that both in version 1 with an orientation of 0° and in version 3 model the ultimate strength of the material, of 410 MPa, is not surpassed. The posts mainly suffer elastic deformation, and only plastifications are found in the areas close to their base. In model 2 stresses reach 637 MPa. However, they are found in very small areas of the intersection between the welded plates in the pole base and the tubular profile. It is believed this problem is easily eliminated increasing the contribution material of the welding, what would make the tensions in those points to be distributed on a bigger area. In version 1 with an orientation of 90° stress reached 430 MPa, but again it happened in very small areas around the base holes. The reason for this stress is the excessively restrictive boundary conditions at the post base due to the simplifications taken in the model to improve the convergence, so they are unrealistically high. Therefore, it is determined that the 3 options initially studied are equally valid.

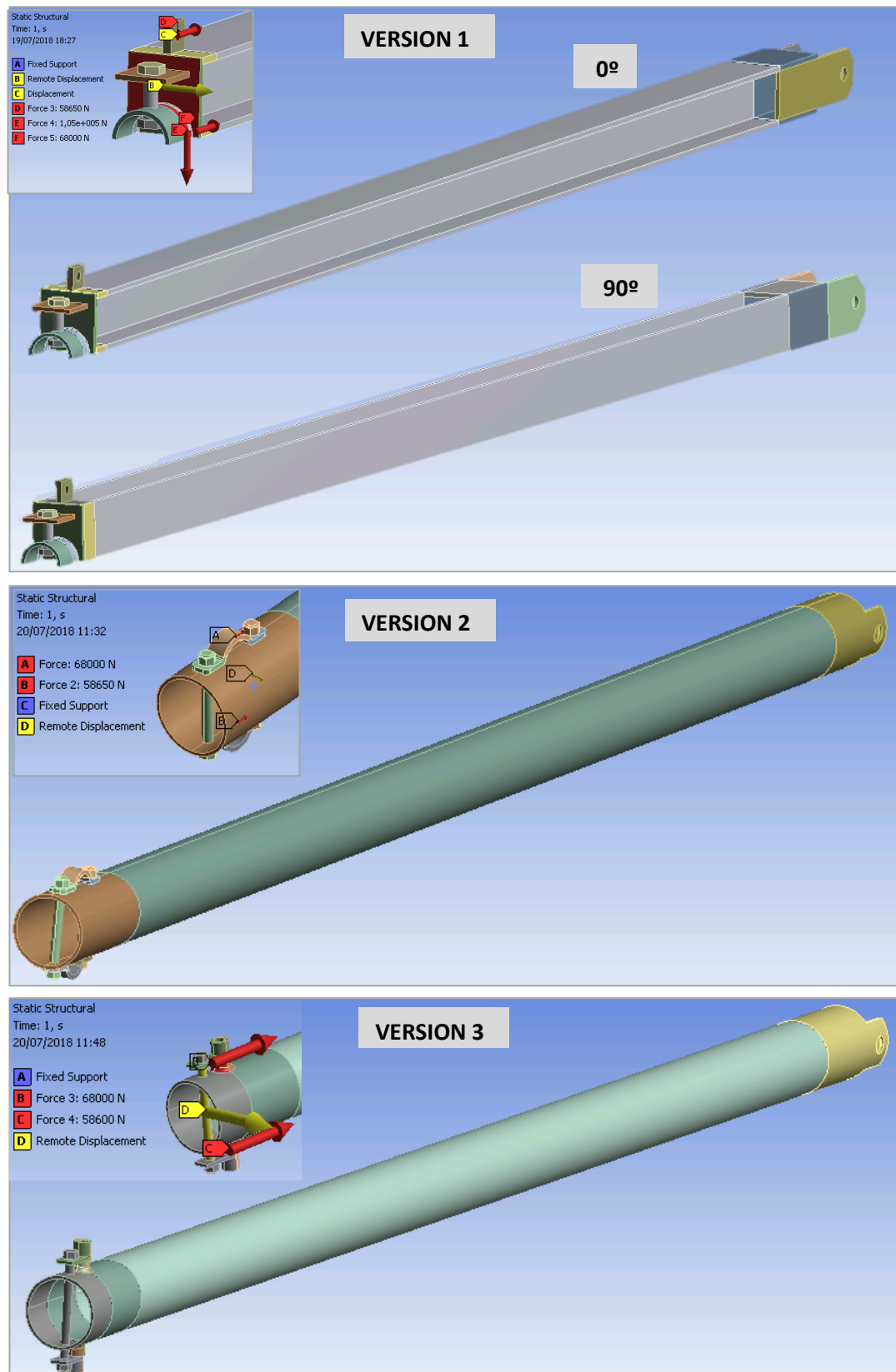


Figure 20. Geometry and loads applied to versions 2 and 3 of post studied.

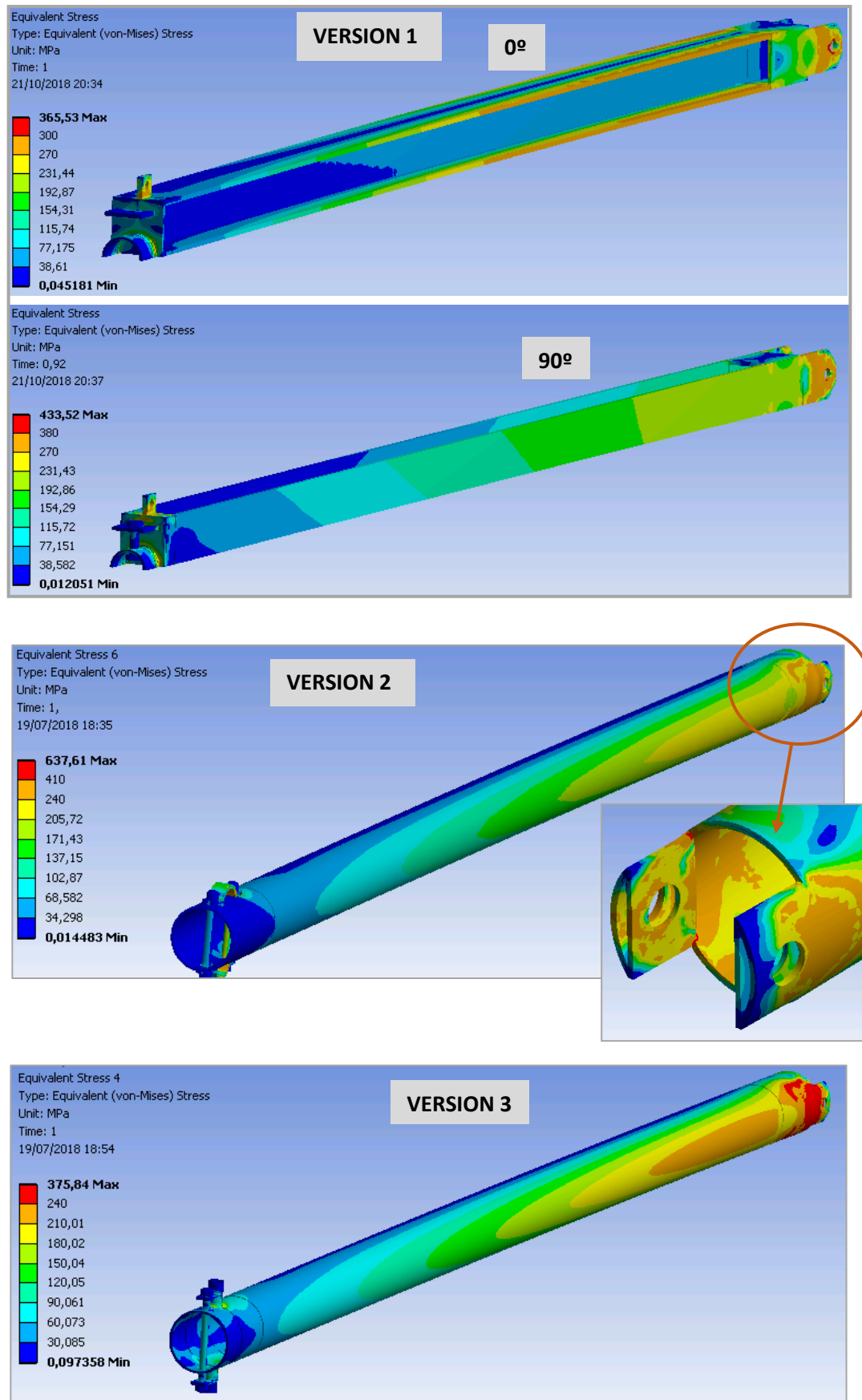


Figure 21. Equivalent stress resulting in the 3 versions of post studied.

The selection of the most suitable geometry between the 3 post versions presented is based on three criteria: minimisation of weight, performance due to inertia and the minimization of sharp edges and critical points that cause the cables break. According to these conditions, option 3 is selected as the most appropriate, since:

- HEB140 is heavier than the circular profile.
- Circular profiles have same inertia moments in the two perpendicular axis.
- The post head is less aggressive with the perimeteral cable in the case of a welded tube.

Afterwards, and considering the reduced area of plastic deformation, it is decided to lighten the design 3 to make the installation work easier to operators. Then, a new model is carried out with an outside tube diameter of 114,3mm and thickness 8mm, whose mass is 22,31kg, 21% less than the previous. Additionally, the fixation method of the upstream cable is slightly modified to avoid undesirable interactions between this cable and the perimeter cable. Hence, the lower guide is removed, and it is substituted by two tubes welded at both sides of the post, 20 cm backwards with respect to the upper perimeter cable guide.

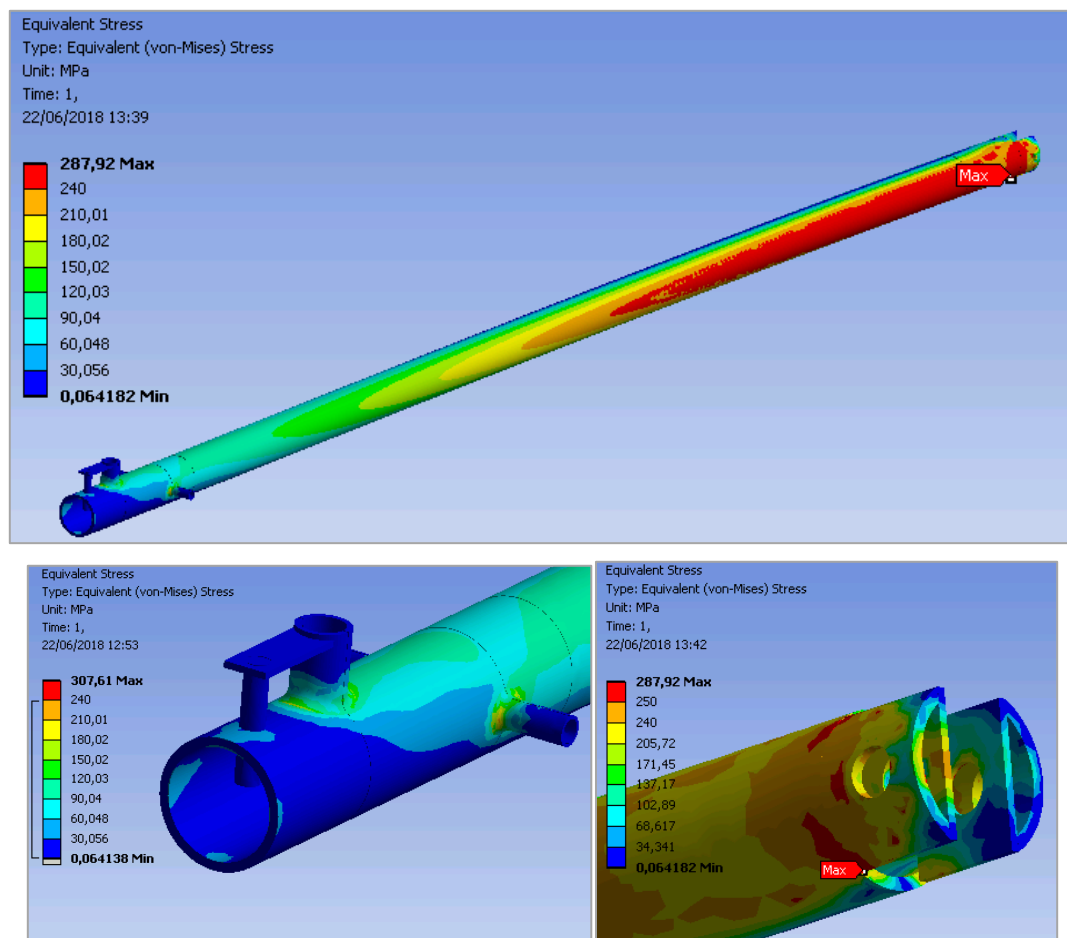


Figure 22. Tensions of Von Mises resulting in the definite post a) complete model, b) detail of the guides of the post head for the perimeteral cable and upstream cable, and c) detail of the post base.

Although the stress over the yield point (Figure 22) is higher in this model respect the previous, the plastification is very reduced and disappears in practically all the post length at a stress of 250MPa. Plastification only appears in very small areas of the post base, not surpassing the 287 MPa, lower value than that of the material break.

6.2 Anchor plates

Figure 23The three versions shown in Figure 23 left were considered. All of them are manufactured with steel A42.27ES. In the first 2 versions, the perimetral cable is guided by a shackle or shackles that are somehow linked to the plate. This connection in the first case is reached through an horizontal bolt that is located under the main bolt that connects the post and the anchor plate. In the second version the connection is reached by the perforation of a hole in one of the vertical steel pieces that hold the main bolt. Such guide shackles are eliminated in the model FEM to simplify the load application. The boundary conditions, the loads location and finite element mesh are found in Figure 23 left and central. The friction coefficients between the bolts and the sheet holes will be in all cases of 0.2, value commonly used in interactions steel-steel.

None of the plates surpassed the material ultimate strength. Only plastic strains appear in small areas, which are usually placed around the insertion holes of the bolts (

Figure 23, right).

The first two versions presented are the simplest concerning their manufacture. Nevertheless, there are two drawbacks:

- Shackles were considered an advantage for their ease of setup. However, they offer at the same time an excessive mobility and unstability to the mentioned cable. Additionally, it is not fully a safe component, because it may be subtracted from structures located in areas easily accessible to individuals.
- Shackles could impact without control with the lower fixation bolt of the anchor plate, causing unplanned situations like the obstruction of the perimetral cable, the shackle break or the modification of the trajectory of the perimetral cable.

For this, version 3 is the one having the most fixed perimetral cable and, at the same time, keeps the simplicity in case of substitution of the perimetral cable and the freedom to slide and displace. That is why it was selected for its manufacture and use in the final barrier.

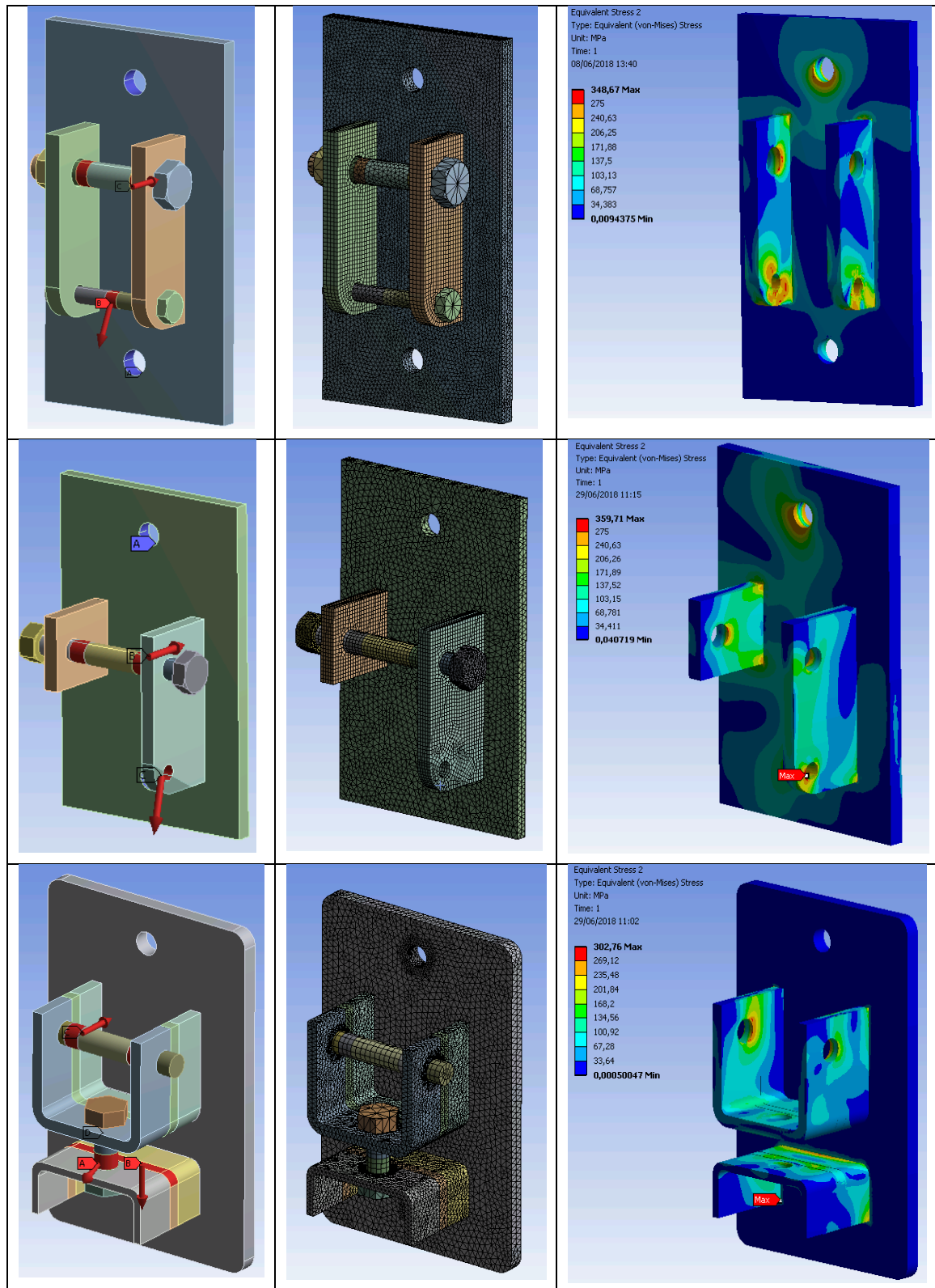


Figure 23. Three options of anchor plate considered in the study. Application of loads (left), mesh of finite elements (centre) and equivalent stress (right).

7 Corroboration of the models

Once the barrier size has been selected by the DoE by considering the operational and setup limitations, experimental tests must be carried out to corroborate the verisimilitude and viability of the selected model. The tests are performed following the guideline ETAG027, described in the state of the art.

Although the maximal energy obtained in the simulations for the type of barrier selected is of 513 kJ according to the numerical simulation and 520 kJ according to the analysis DoE, it is decided to carry out a first test applying to it a safety factor with the aim to ensure the certification for its marketing in, at least, one energy level.

Consequently, tests are carried out to 2 barriers using different energy levels. The first was tested at a maximal energy of 250kJ and, later, a test was performed on the same barrier to a maximal energy level of 500kJ. In the latter one small variation could be done considering the results of the first test.

7.1 Barriers description

The barriers have 3 functional modules of 10mts length and 4mts width. The wire mesh MT15000 is kept upright thanks to four posts of circular profile described and calculated in the previous section. The posts are connected to the anchor plates by a horizontal bolt.

The wire mesh MT15000 is fastened to the perimetral cables by a sewing cable. It is made to pass by the mesh every 3 turns, and a preinstalled cable in all the outline of the net helps to the homogeneous distribution of the stress on the rest of reticles which are not directly sewn (Figure 24).

As defined in section 5, this barrier will only have an upstream cable per post and in each of the upstream and lateral cable there will be an energy dissipator of 6 tubes. It is foreseen that this energy dissipator will be able to dissipate 62kJ according to the experimental estimations obtained in the section 4.3 and extrapolating to a model of 6 tubes.



Figure 24. Wire mesh MT15000, perimetral cable, preinstalled and sewing cable.

A safety cable was added in all the brakes, which will avoid a discontinuity in the perimetral or upstream cable in case of brake break (Figure 25).



Figure 25. Image of a brake in an upstream cable.

The main difference between the barrier tested at 250 kJ and tested at 500 kJ is found in the diameter of perimetral cables. While for the barrier of 250 kJ perimetral cables are of 16 mm diameter, for the barrier of 500 kJ it was decided to substitute those cables for cables of 20 mm diameter. The reason for this modification was a consequence for the results obtained in the test of the first barrier and it is detailed in section 7.2.1.

Both barriers will be instrumented with 2 types of sensors: force sensors for perimetral cables, lateral and upstream cables, and extensometric gauges for the measurement of stress in the mesh wires and to measure tension in the fixation bolts of the anchor plate to the ground.

In relation to the impacts defined by ETAG 027, two blocks of different size and mass for the tests SEL and MEL are used. All the details are found in Table 7.

Table 7. Properties of the blocks used in the experimental tests of the barriers of 250 kJ and 500 kJ.

| | | Block mass (kg) | L_{ext} (m) | Velocity (m/s) | Energy (kJ) |
|----------------|-----------|--------------------|------------------|----------------|----------------|
| Barrier 250 kJ | SEL 1 y 2 | 272 | 0.6 | 25 | 85.03 |
| | MEL | 821.25 | 0.8 | 25 | 256.73 |
| Barrier 500 kJ | SEL 1 y 2 | 460.5 | 0.65 | 26.94 | 167.15 |
| | MEL | 1429.5 | 0.95 | 26.94 | 500 |

7.2 Results

7.2.1 Barrier of 250kJ

There were no breaks in any of the components of the barrier neither in the two SEL impacts nor in the MEL impact. The blocks did not cross the barrier and it was able to cancel the kinetic energy that the blocks carried in their vertical trajectory to the ground. This visual inspection agrees with the force sensors results, which did not surpass in any case the ultimate load of the cables.

In the tests SEL2 and MEL the blocks bounced, reaching the ground after passing by the upper part of the barrier in the case of the second SEL, and slipping through the barrier and the slope in the case of the test MEL. The bouncing is associated to the low or null activation of the brakes and the elastic performance of the mesh.

On this barrier a fourth launching with an energy of 362 kJ was performed, with the aim to locate the weak points of the structure. Although the barrier was able to bear the block, the perimetral cable closer to the ground broke. That is why to ensure its resistance to the 3 impacts in the barrier of 500kJ the diameter of the perimetral cable of 16mm was substituted by one of 22 mm diameter.

7.2.2 Barrier of 500kJ

The impacts SEL were successful. The barrier was able to bear the block without the break of any of its main components. The events to highlight in this test were the following:

- In the MEL impact the fixation of the left upstream cable displaced due to wrong blocking of the cable clamps.
- The cable of the brake located in the right upstream cable broke, leaving the post hanging from the safety cable.
- A displacement of 40 mm was produced in one of the aluminium caps in one of the lateral cables.

Despite the facts described in the previous points the barrier was able to retain the block in the 3 impacts and surpassed all the requirements described by ETAG0027.

The bouncing was smaller than in the case of the barrier of 250 kJ, so that in none of the 3 impacts the block reached the ground, but it was retained in the barrier.

8 Fitting of the FEM model

Two FEM models were created with the same geometry and materials of those of the 250 kJ barrier and the 500 kJ barrier. They were submitted to SEL and MEL tests. Load registers versus time were extracted and compared with that of the experimental tests in perimeter cables, lateral cables and upstream cables. Results are shown in black and blue lines in Figure 26 to Figure 29. Except for SEL impact of 250 kJ barrier, all other numerical load registers fit well with the experimental maximum loads on cables. The higher differences are found in lateral front cables.

Comparing maximum elongation of the barrier of the first SEL impacts, a difference up to 32 % is found in the 250 kJ barrier (Table 8. Maximum elongation on the first SEL impact. Results of experimental tests, FEM model and modified FEM model.). This error level suggests that the sliding of the mesh MT15000 through the preinstalled cable hardly happened. To solve this, the original model was modified and a fixed connection between them was implemented. The connection of the group mesh+preinstalled cables and the perimeter cable did not change, so shackles were kept in the model (Figure 30).

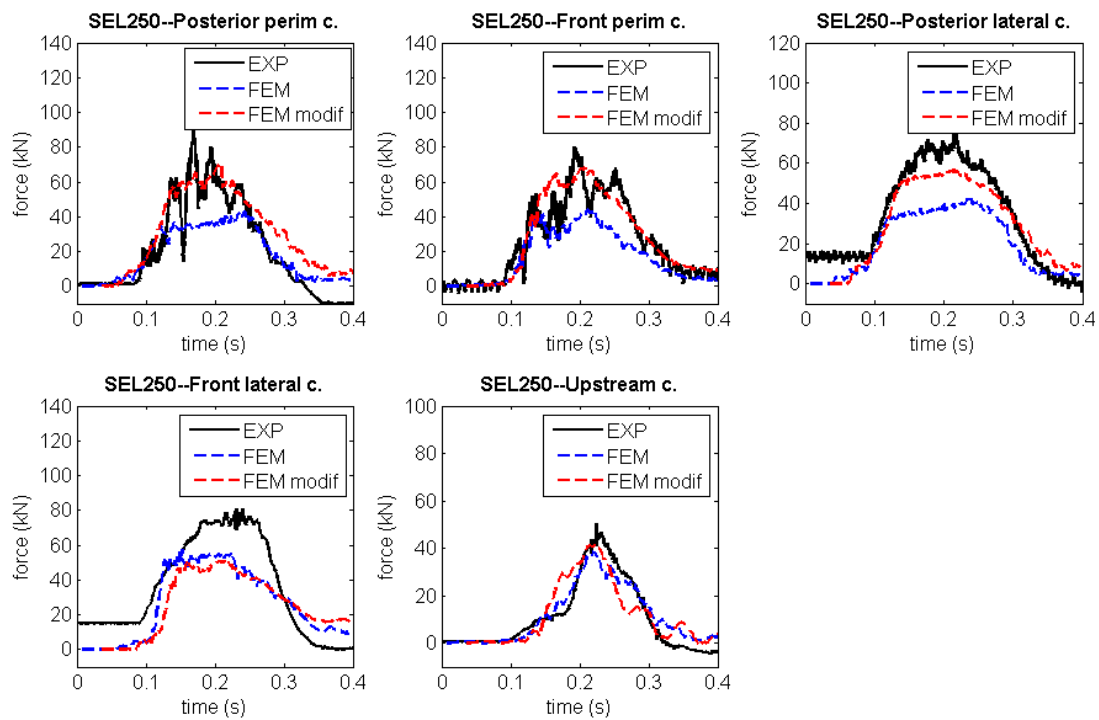


Figure 26. Graphs Load-Time of the 1° SEL test (85 kJ) in the 250 kJ barrier. Comparison between experimental tests, FEM model and modified FEM model.

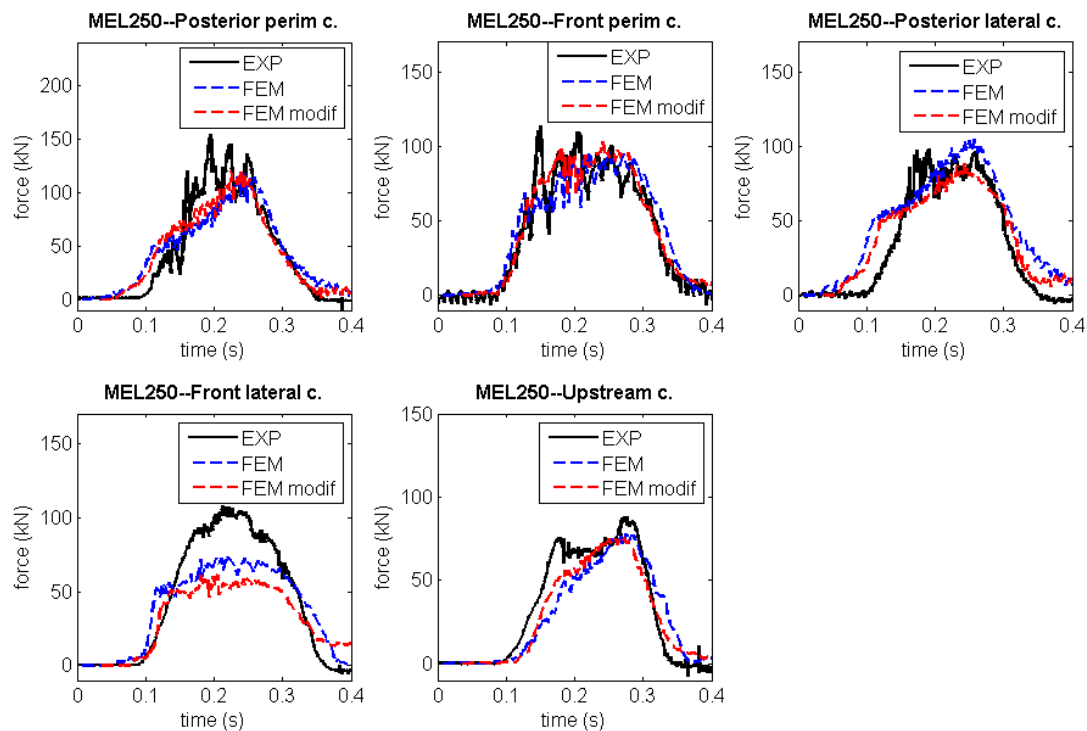


Figure 27. Graphs Load-Time of the MEL test (250 kJ) in the 250 kJ barrier. Comparison between experimental tests, FEM model and modified FEM model.

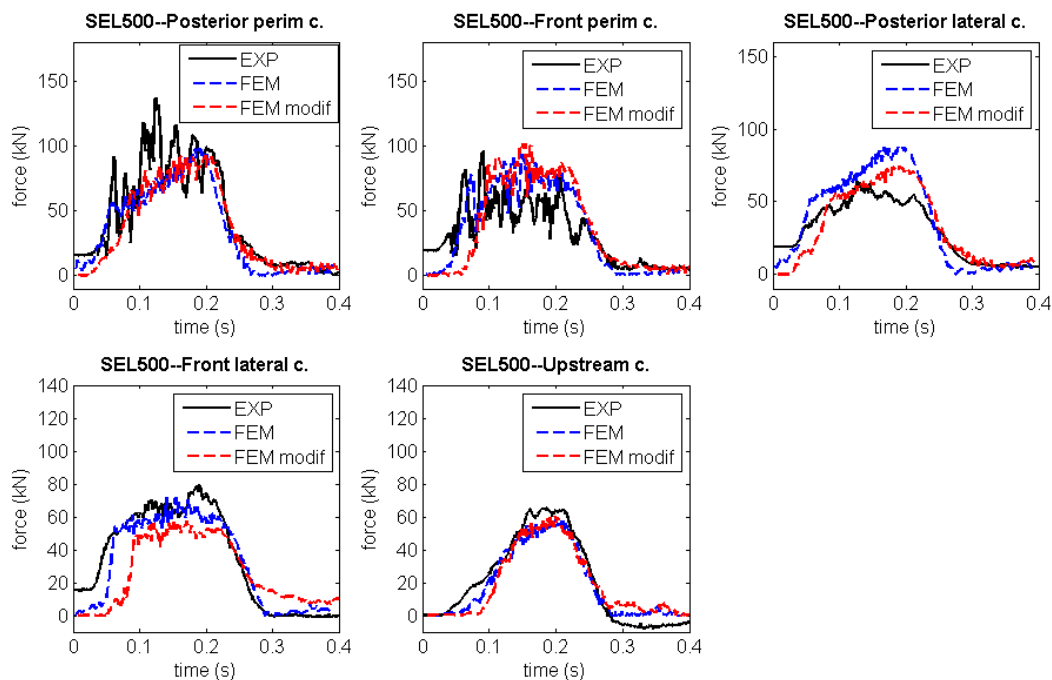


Figure 28. Graphs Load-Time of the 1º SEL test (167 kJ) in the 500 kJ barrier. Comparison between experimental tests, FEM model and modified FEM model.

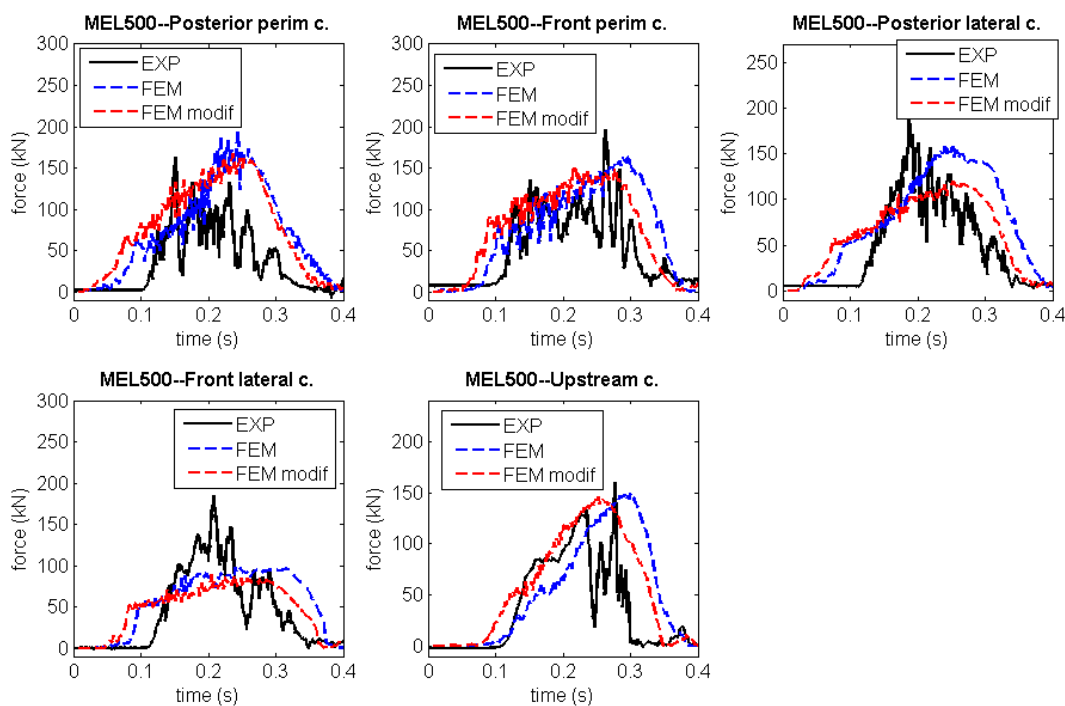


Figure 29. Graphs Load-Time of the MEL test (500 kJ) in the 500 kJ barrier. Comparison between experimental tests, FEM model and modified FEM model.

Table 8. Maximum elongation on the first SEL impact. Results of experimental tests, FEM model and modified FEM model.

| | | 250 kJ BARRIER 1º SEL IMPACT (85 kJ) | 500 kJ BARRIER 1º SEL IMPACT (167 kJ) |
|--------------------|---|---|--|
| Maximum elongation | Experimental test (initial sag + elongation due to impact) | 2.67 | 3.47 |
| | FEM simulation S1 ($\mu = 0.4$) | 3.54 | 4.21 |
| | Modified FEM simulation S2 (link of preinstalled cable and mesh MT15000) | 3.17 | 3.40 |
| Error S1 | | 32% | 21% |
| Error S2 | | 19% | 2% |

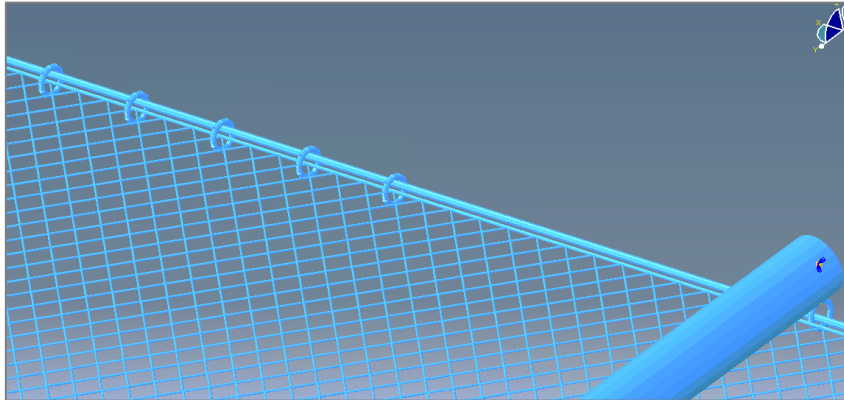


Figure 30. New (fixed) connection between preinstalled cables and wire mesh MT15000.

The modified models were again calculated in SEL and MEL impact conditions. The results of the modified FEM simulations are shown in Figure 26 to Figure 29 in red colour, together with the original FEM model and the experimental test results.

With the modified model, loads fit better than the original model in SEL impact on the 250 kJ barrier. In the MEL impact of this barrier and both SEL and MEL impacts on the 500 kJ barrier, load results did not improve the ones of the original FEM model. Maximum elongations reduced its error with the new model configuration in all the cases, as it can be seen in Table 8.

However, in the MEL impact of the 500 kJ barrier, one of the preinstalled cables break prematurely, whilst this did not occur in the real test, surely due to the hard restriction of displacement. This break induces to successive breaks in the wires of the membrane close to the posts. This wrong behaviour could be solved increasing the resistance of the cable or its diameter. With this artificial correction the model works properly, but adds the uncertainty of the real breaking instant of this preinstalled cable. Because of that, the performance of a new Design of Experiments would not be valid, since its results could be conditioned by the good performance of the preinstalled cable.

Hence, the original model, despite showing less precision in predicting maximum elongation, is more accurate since it does not give results with premature (and unreal) breaks. Also, the original model is in the safety side due to the overestimation of the elongation.

9 Improvements applied to the final barrier

By a visual analysis of the finished product, it was possible to distinguish performances of the barrier showing that certain improvements had to be applied before marketing the product.

Modifications that will make the setup easier:

- Division of the membrane in modules of shorter length. Use of clips to connect and fix modules that could be designed on purpose using the same steel wire than that of the mesh.
- Reduction of the weight of the membrane by keeping the geometry, reducing the wire diameter and using a high resistance steel with better properties than the used in MT15000.

Modifications to improve performance:

- Modification of the geometry of the anchor plate to help a bigger turn of the post around the base. This will be useful in case of barriers installed in a vertical setup.
- Use of clips to fixate the mesh and perimetral cables instead of a preinstalled cable and a sewing cable. The new connection system will increase the "curtain effect".
- Set up of 2 upstream cables per post to avoid the exhaustion of premature break of the upper brakes.
- Liberate the mesh of the extreme posts to reduce bouncing.

10 Conclusions and future lines of research

The main conclusions and contributions of the present thesis are the following:

- The triangular cable nets absorb different amounts of energy depending on their orientation, and this is always lower than that of the square net and the wire mesh MT15000. This is due to the reduction of the diameter of the cables respect the square mesh (diameter 6 vs. diameter 8), and to the limitation of the deformation generated by the diagonal cable that form the triangles from the square net. When the deformation is reduced the elongation is also reduced.
- Among the analysed nets, the mesh MT15000 has been the one that highest energy is able to absorb, both in absolute terms as of efficiency in relation to mass. For this not only the static tests have been analysed but they have been used to calibrate models of finite elements and perform dynamic simulations on one functional module of mesh and on a complete barrier, with the aim to study the nets in the real boundary conditions and dynamic loads to which they will be submitted.
- An energy dissipator that works mainly by the deformation of its components has been developed. Its main advantage, unlike the brakes whose system of dissipation is friction, is a system that presents a curve Load-Displacement completely regular, so that its activation energy, maximal displacement and absorbed energy are known, independently from the number of tests to carry out.
- By an analysis DoE it is found out that the 4 factors analysed (width and length of the functional modules, number and location of the brakes and sewing of the net around the posts) have influence on the energy that a barrier can absorb due to the impact of a block. The quantification of the influence of such parameters in the response is found by the second order regression equation in which both the variables or independent factors as the interaction among them take place.
- The design of the posts and the anchor plates is done on purpose in relation to the loads foreseen in the model which will be tested, taken from the model of finite elements both in the head as the base of pole.
- After looking at the experimental results of the complete barrier, it is verified that the perimetral cable of diameter 16mm is insufficient to bear the impact foreseen of 500kJ.
- FEM simulations of the complete barriers give load registers with a good fitting to the experimental tests. However, the values of maximum elongation are overestimated up to 32% in 250 kJ barrier and 21% in the 500 kJ barrier. The solution carried up to improve these discrepancies is to physically fix the preinstalled cable to the membrane, and the

modified models reduce the error to 19% in the 250 kJ barrier and 2% in the 500 kJ barrier. Despite the improvement of the models in terms of maximal elongation, they are not completely valid in the case of the MEL impact on 500 kJ barrier. The posterior preinstalled cable break, and as consequence, so it does part of the membrane close to the first break points. This problem is amended with the increase of the resistance of the material or the increase of the cable diameter, but it is an artificial (and irreal) solution and doing this it is impossible to know the real stress of the preinstalled cables and, therefore, predict its break. Hence, the original model is decided to be the best one, as it can reproduce the loads on cables and it is conservative in terms of maximum elongation.

The future lines of research starting from the present doctoral thesis are the following:

- The design of energy dissipators using cables of higher diameter to let the tubes of diameter 133 mm and 10 mm thickness to compress completely and dissipate its full energy capacity.
- The use of the wire mesh MT15000 in protection barriers against flows of detritus by their high deformability and resistance. Thanks to the size of its reticle it will be able to bear all the solid components of the flow (rocks, branches, earth) letting fluids pass (water, mud). For the study of the performance of this net against mixed loads of fluid and solid disccret programmes of disccret elements (DEM), of dynamic of fluids (CDF) or mixed DEM + CDF will be used.
- The design of new fixation clips among wire mesh modules, as well as the fixation between the reticles of the net and the perimetral cables, with the aim to avoid the auxiliary cable, and reducing the setup time. Using the same wire that is used in the mesh MT15000, it would be necessary to think in a geometry that combines both simplicity and versatility so that it is useful in both locations and its resistance so that the net is sewn by clips and has, at least, the same load capacity than one without intermediate sewing.

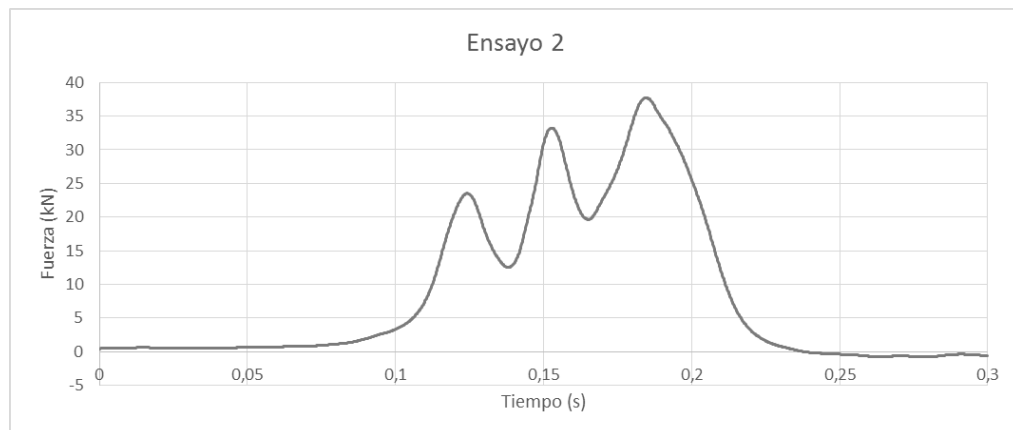
ANEXO I

Resultados de los ensayos dinámicos de los frenos

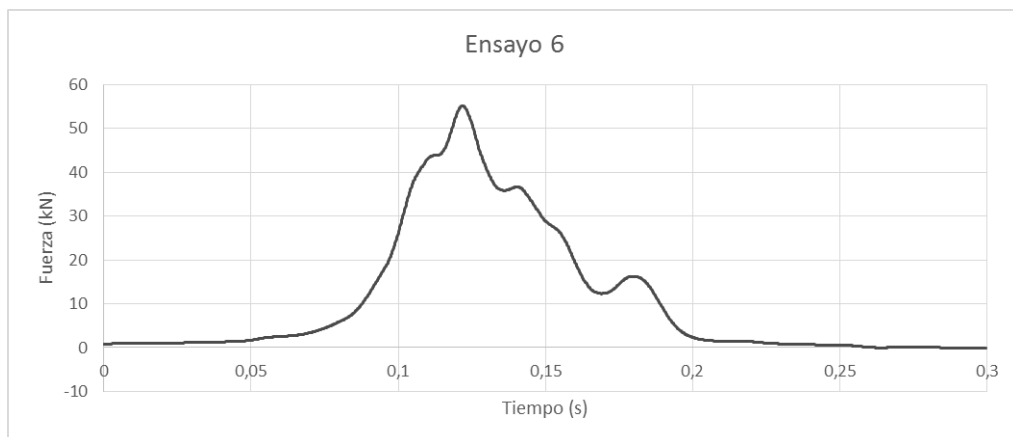
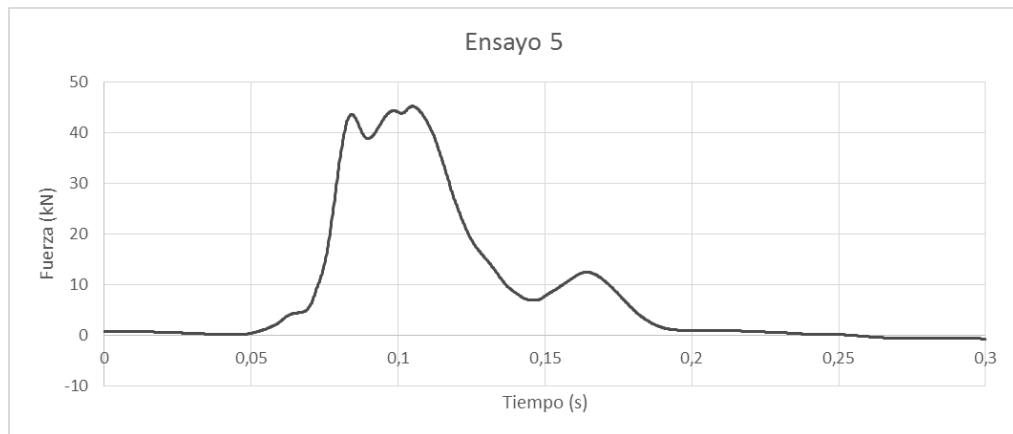
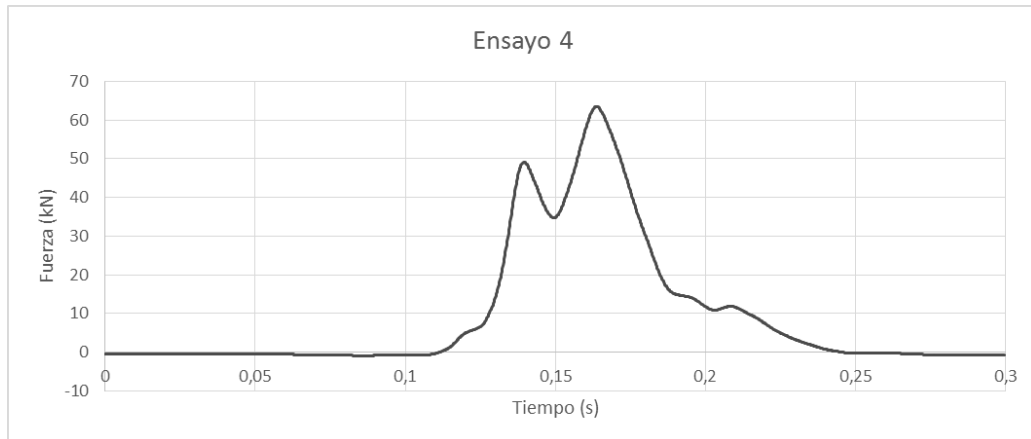
Curvas fuerza-tiempo

A continuación, se muestran los registros de fuerza respecto al tiempo. Con el fin de una mejor observación de fuerzas de activación, y comportamiento del freno, se ha seleccionado un registro de 0.3-0.4 segundos en el momento del impacto.

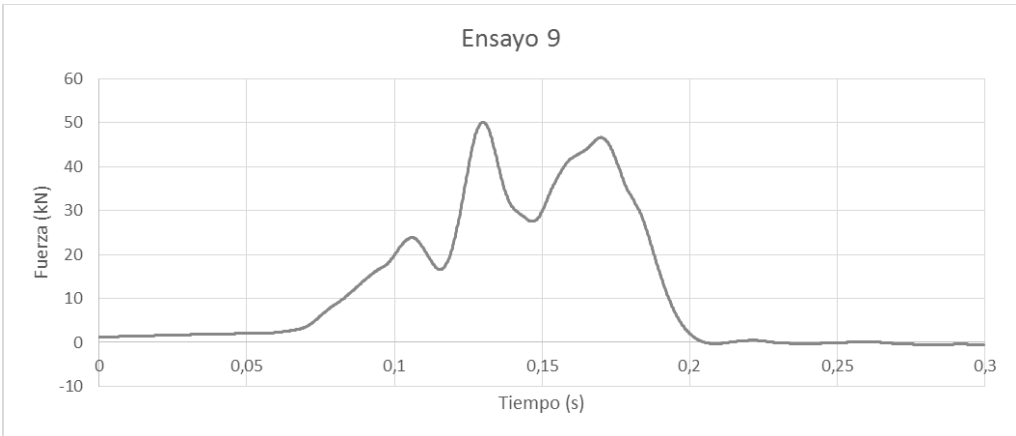
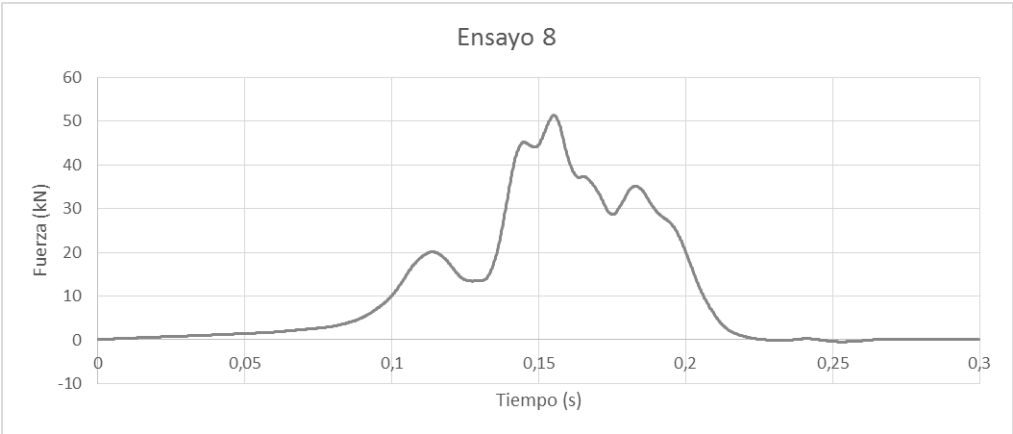
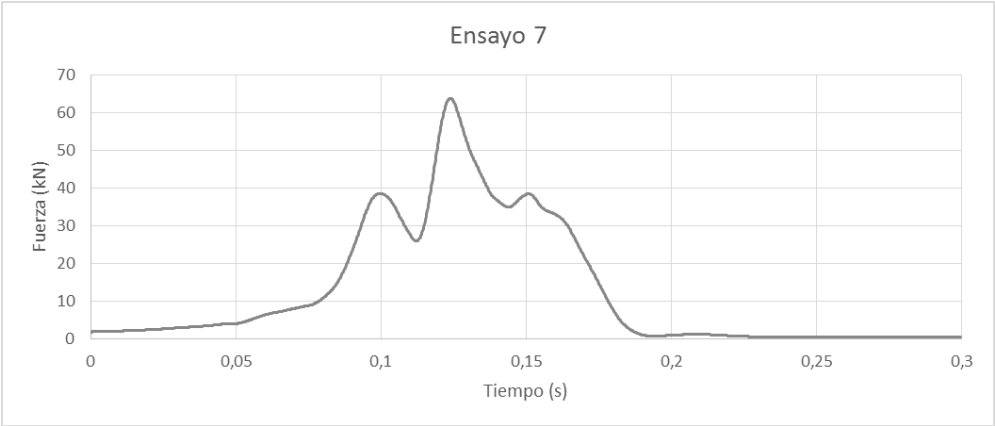
Freno Tipo 1



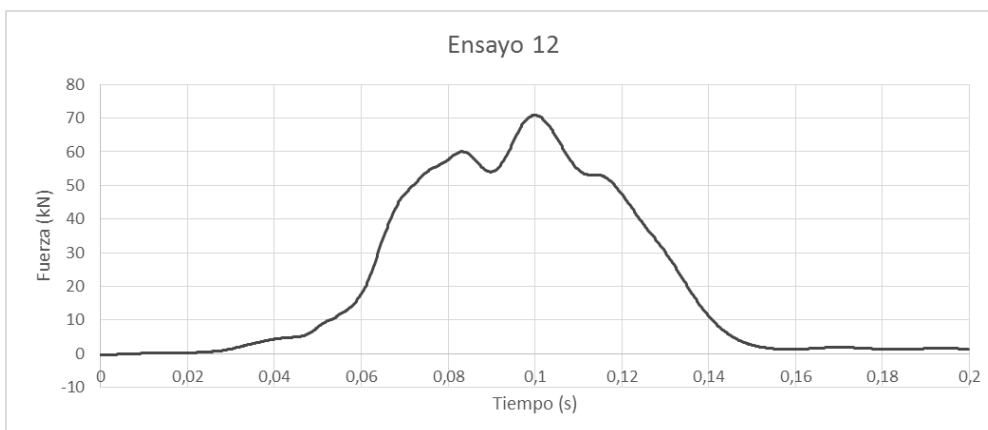
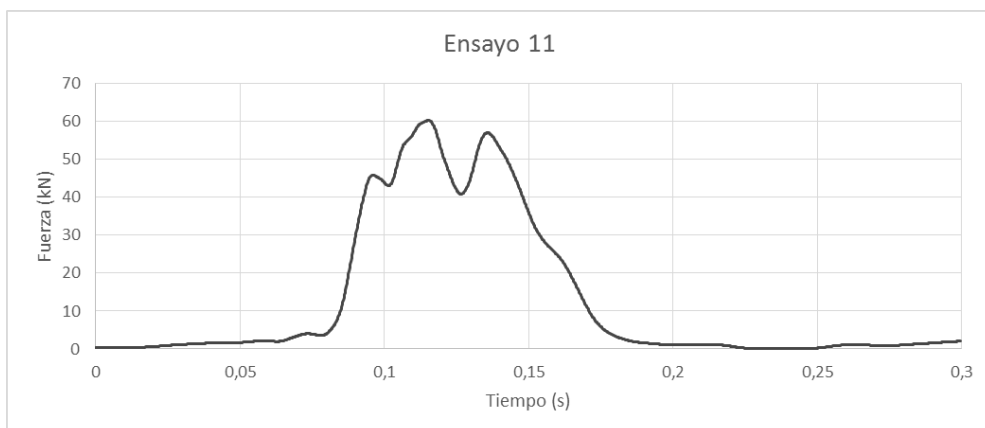
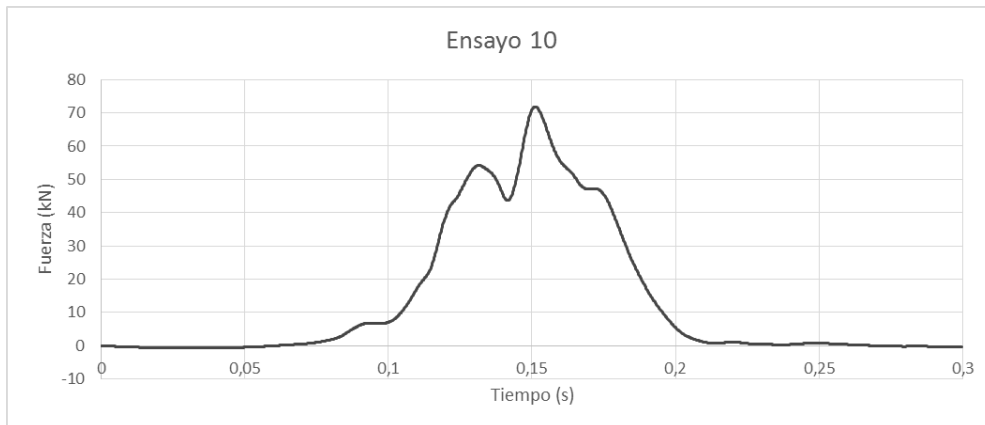
Freno Tipo 2



Freno Tipo 3



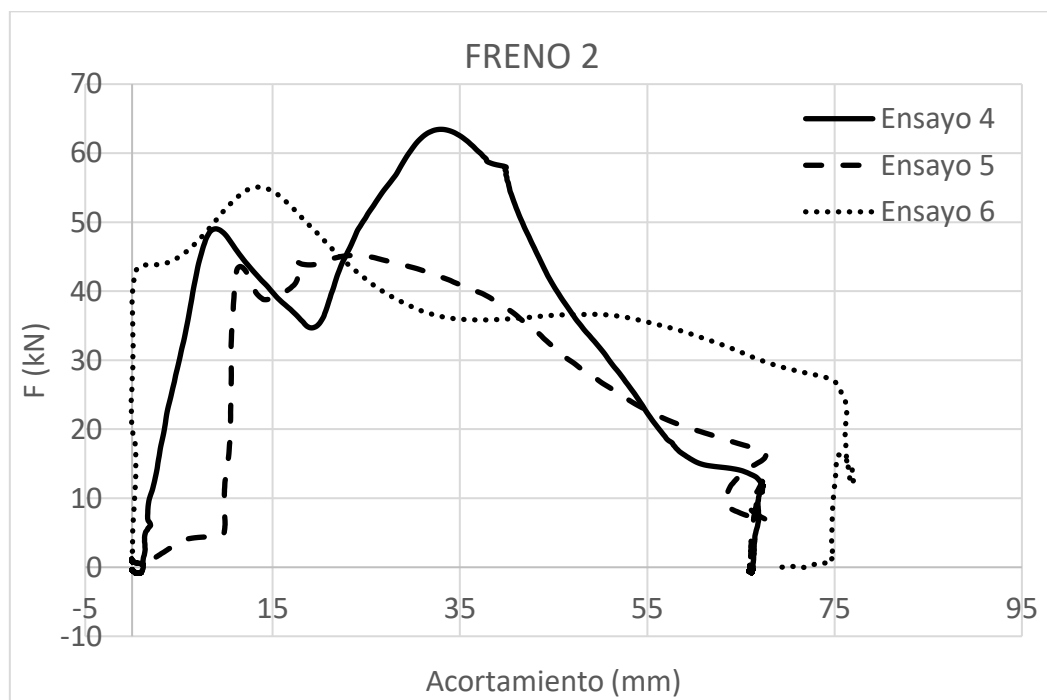
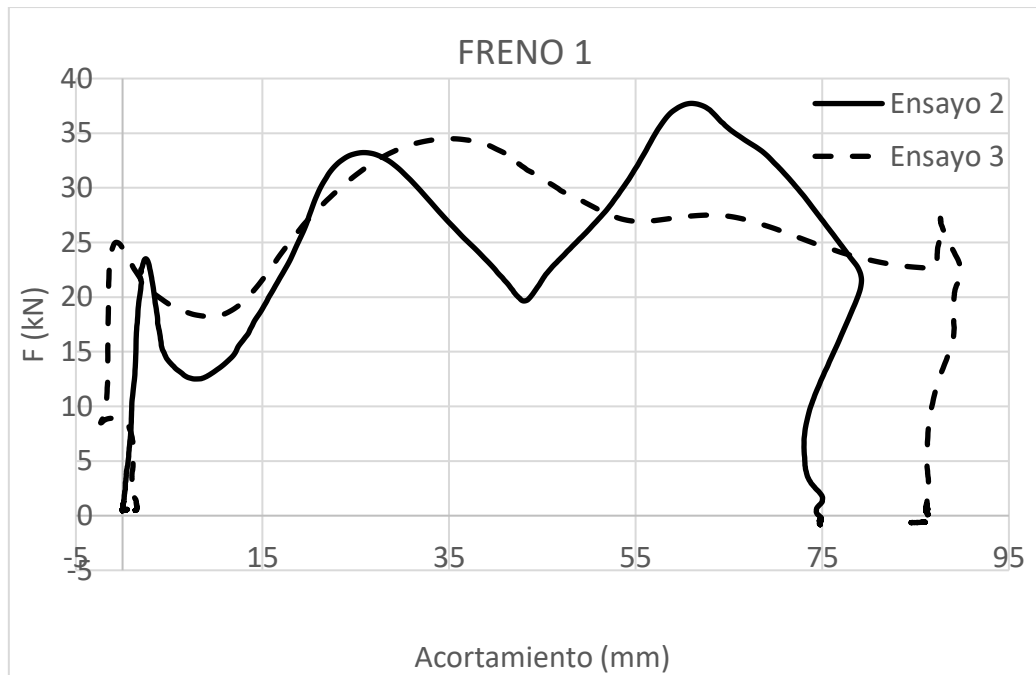
Freno Tipo 4

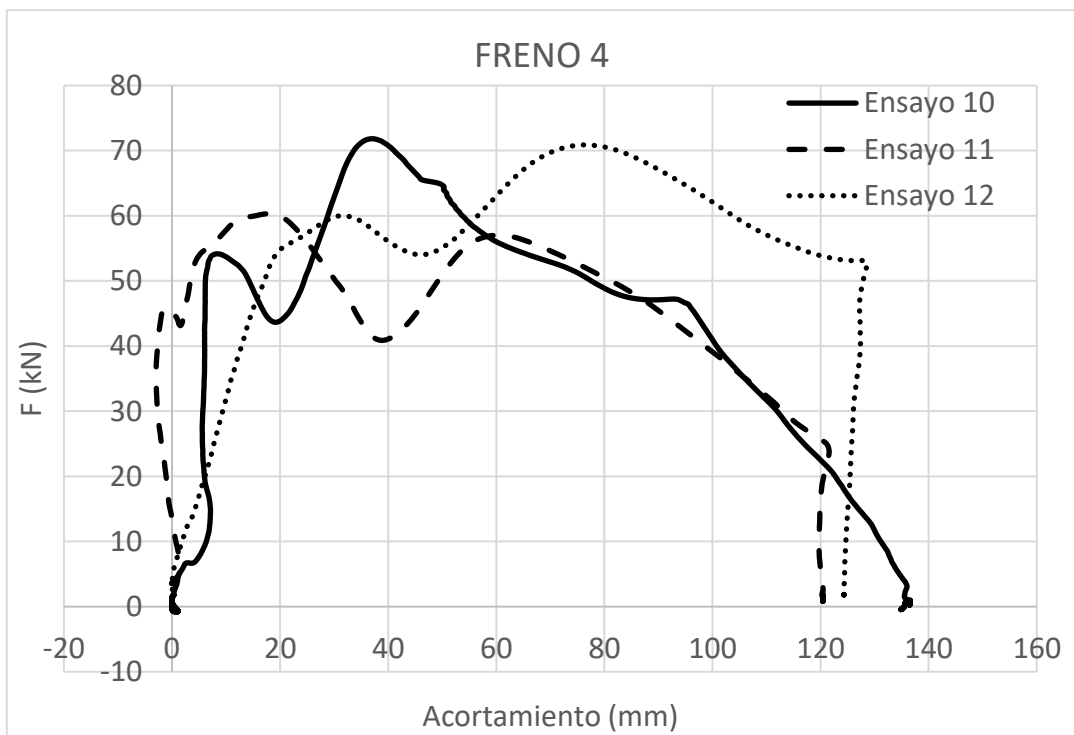
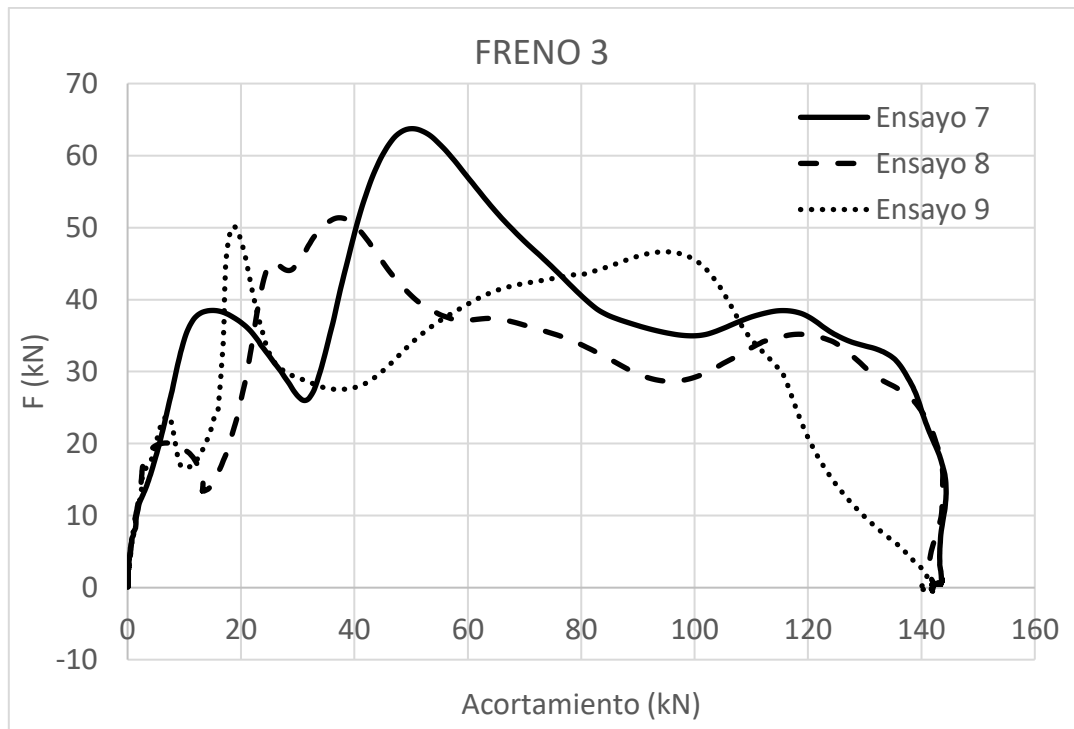


Curvas Fuerza-Desplazamiento

A continuación, se muestran las gráficas fuerza-desplazamiento, a partir de las cuales se obtiene la energía absorbida por cada dispositivo.

Los datos de desplazamiento que se representan en el eje x corresponden a los registros obtenidos mediante los medidores de hilo.





ANEXO II

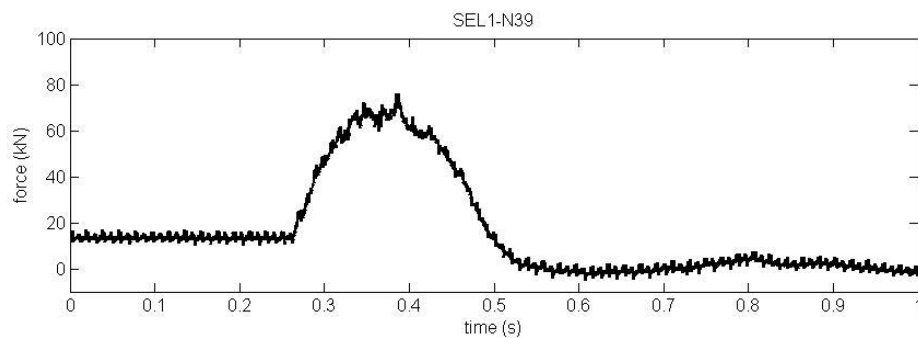
Resultados de los ensayos a las pantallas de 250 y
500 kJ

PANTALLA DE 250 kJ

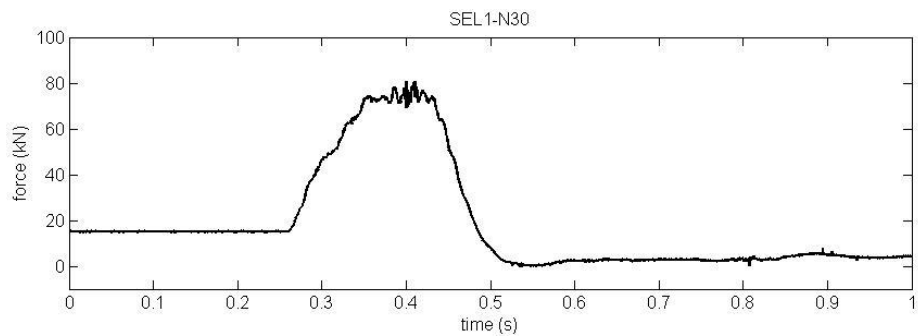
Primer lanzamiento: SEL 1

Se adjuntan a continuación los registros continuos de todos los sensores durante el 1^{er} Lanzamiento. Se representa en el eje y la magnitud física versus tiempo en el eje x.

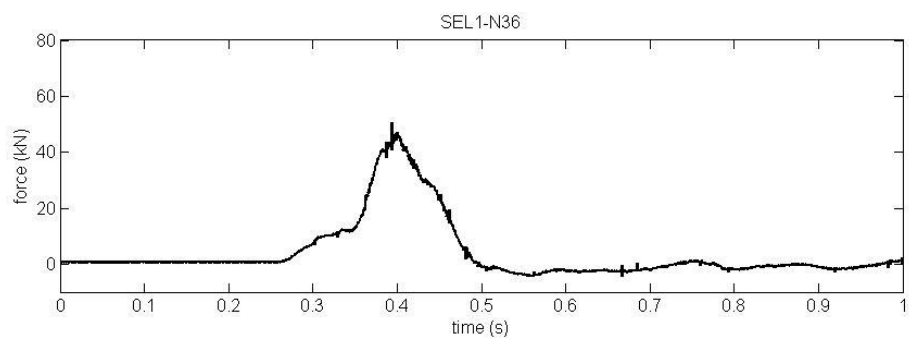
1^{er} Lanzamiento. Sensor N39. Viento lateral detrás izquierda. Registro de datos.



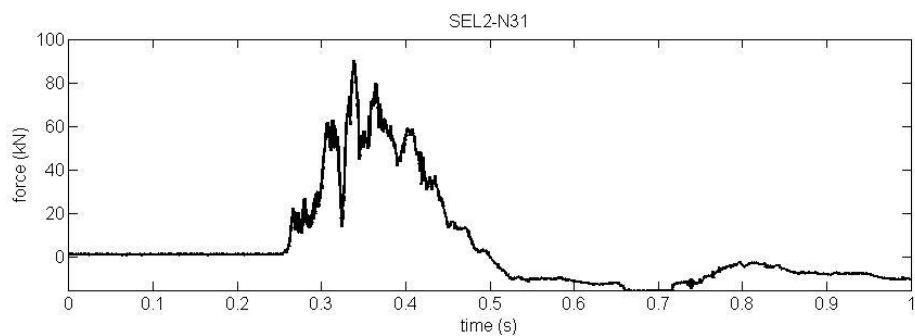
1^{er} Lanzamiento. Sensor N30. Viento lateral delante izquierda. Registro de datos.



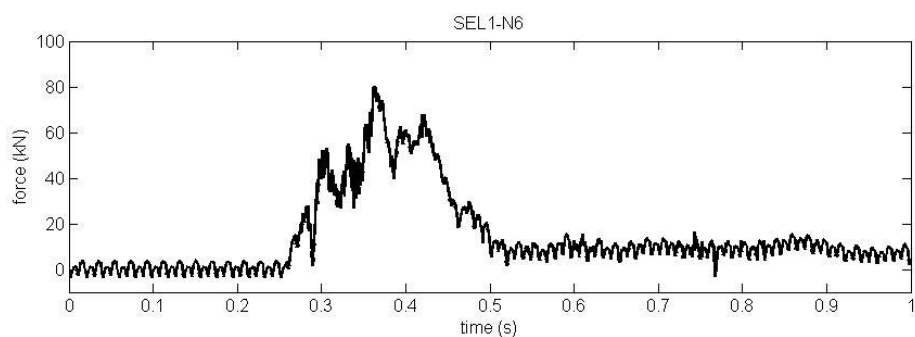
1^{er} Lanzamiento. Sensor N36. Viento superior izquierda. Registro de datos.



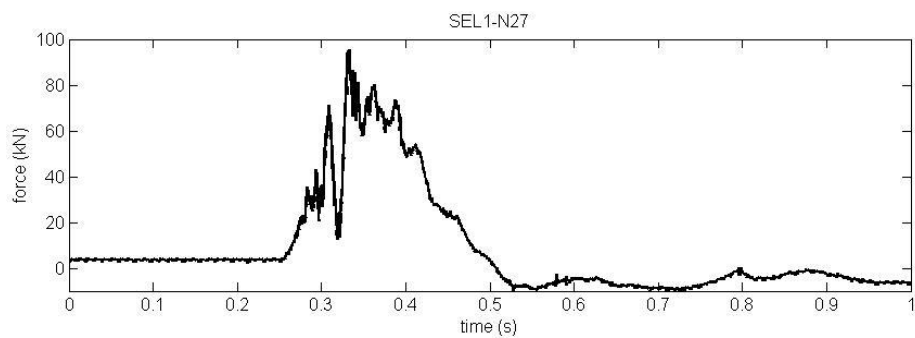
1^{er} Lanzamiento. Sensor N31. Perimetral detrás izquierda. Registro de datos.



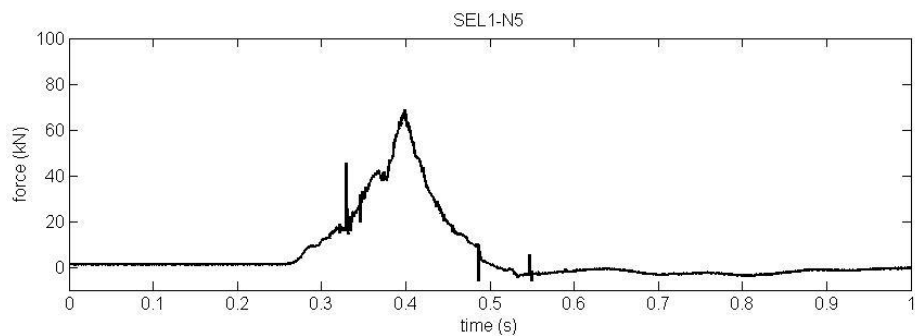
1^{er} Lanzamiento. Sensor N6. Perimetral delante izquierda. Registro de datos.



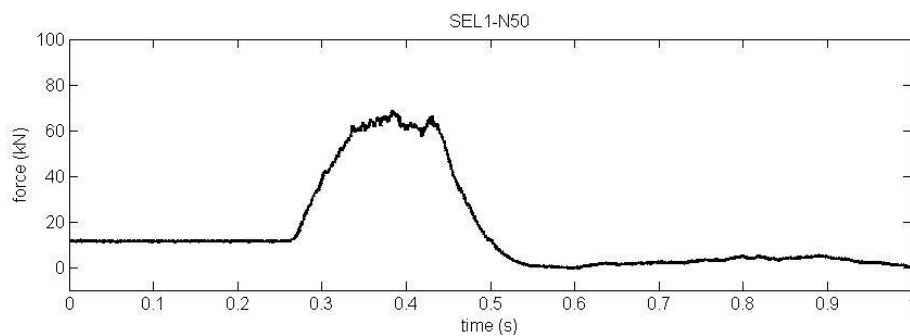
1^{er} Lanzamiento. Sensor N27. Perimetral detrás derecha. Registro de datos.



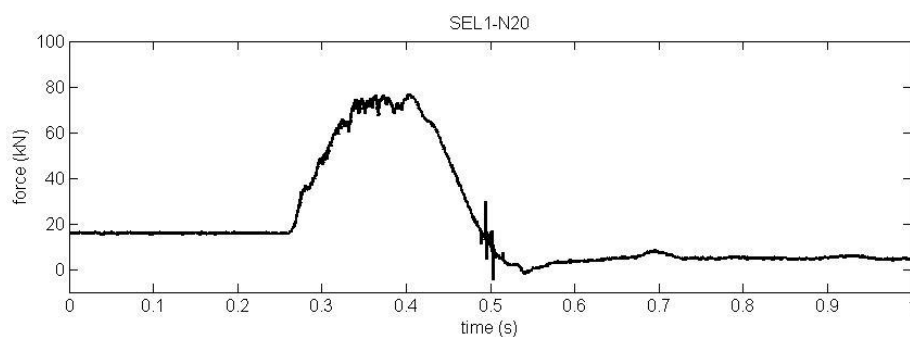
1^{er} Lanzamiento. Sensor N5. Viento superior derecha. Registro de datos.



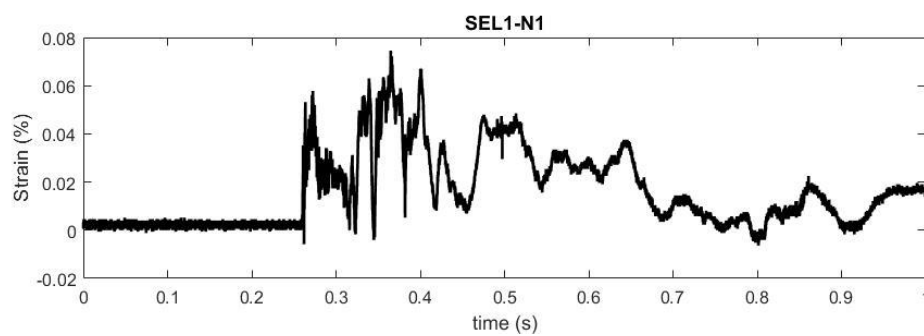
1^{er} Lanzamiento. Sensor N50. Viento lateral detrás derecha. Registro de datos.



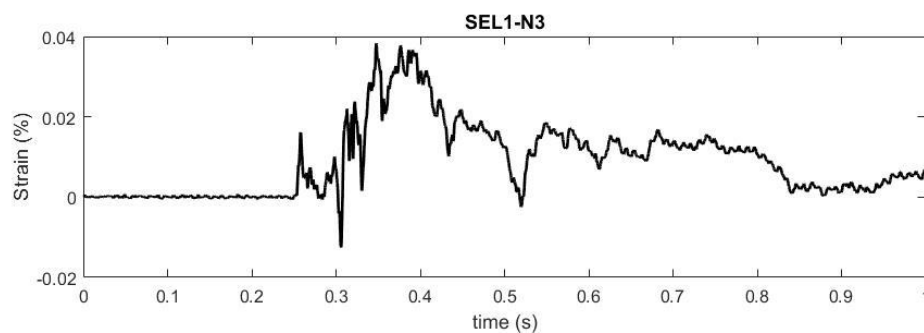
1^{er} Lanzamiento. Sensor N20. Viento lateral delante derecha. Registro de datos.



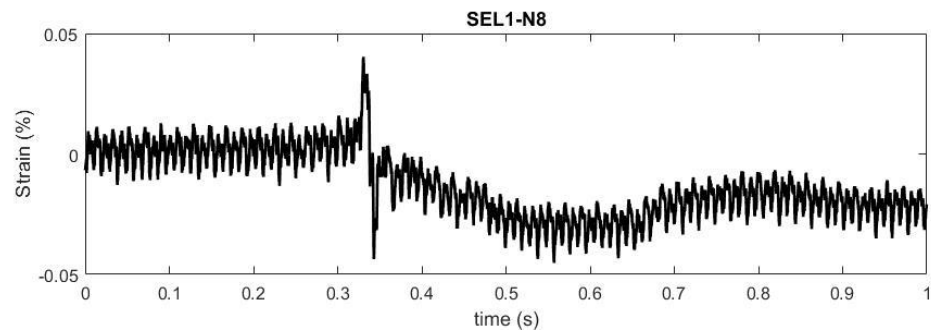
1^{er} Lanzamiento. Galgas N1. Paño central izquierda detrás. Registro de datos.



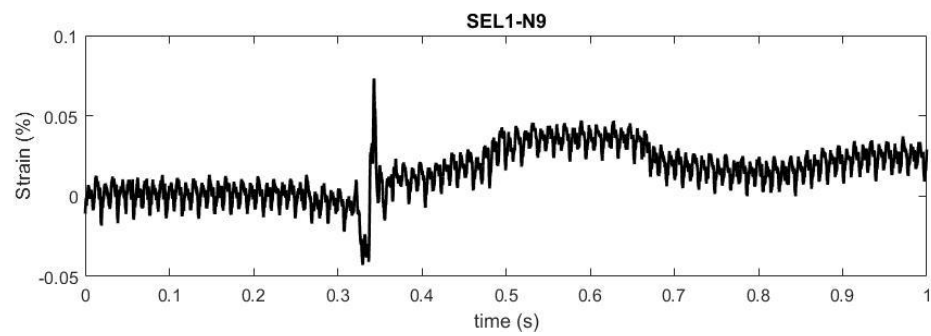
1^{er} Lanzamiento. Galgas N3. Paño central derecha delante. Registro de datos.



1^{er} Lanzamiento. Galga N8. Parte superior del bulón. Registro de datos.



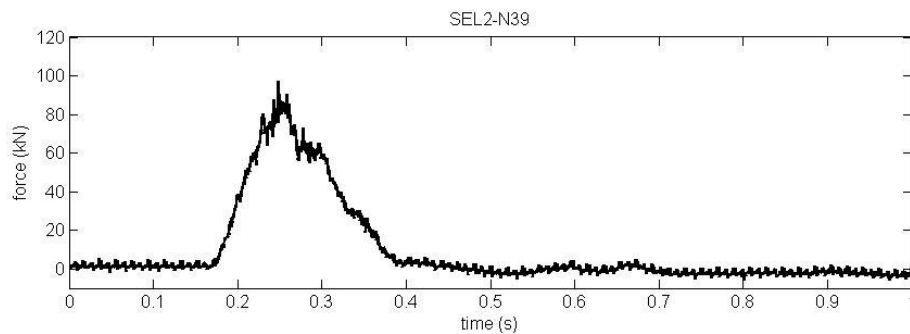
1^{er} Lanzamiento. Galga N9. Parte inferior del bulón. Registro de datos.



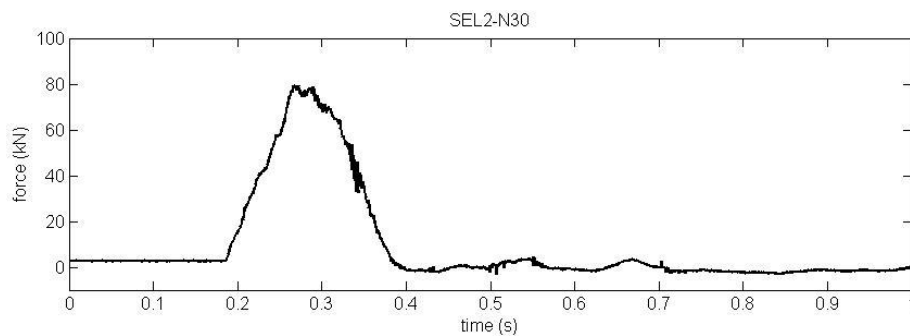
Segundo lanzamiento: SEL 2

Se adjuntan a continuación los registros continuos de todos los sensores durante el 2º Lanzamiento. Se representa en el eje y la magnitud física versus tiempo en el eje x.

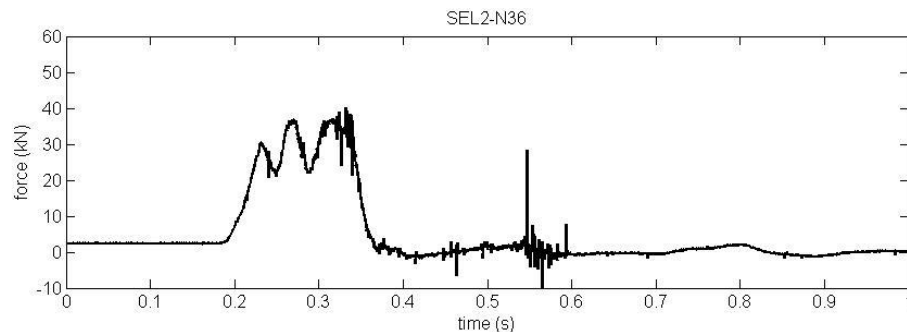
2º Lanzamiento. Sensor N39. Viento lateral detrás izquierda. Registro de datos.



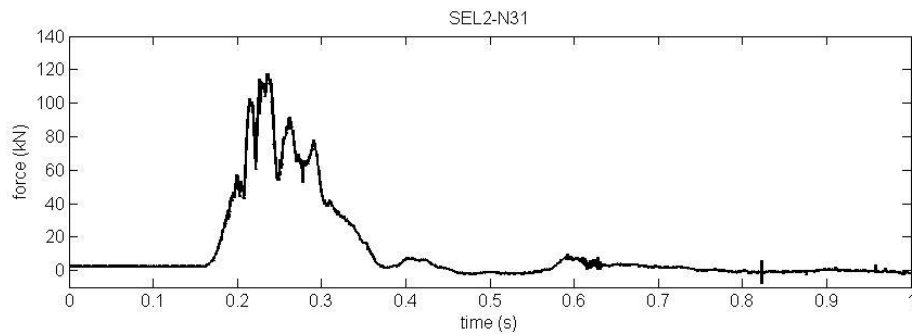
2º Lanzamiento. Sensor N30. Viento lateral delante izquierda. Registro de datos.



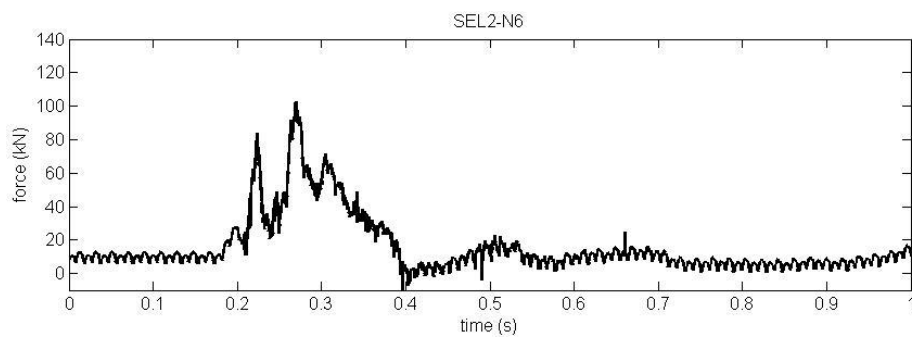
2º Lanzamiento. Sensor N36. Viento superior izquierda. Registro de datos.



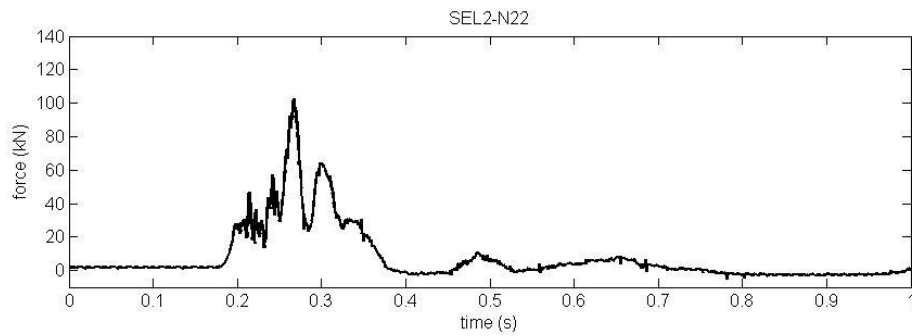
2º Lanzamiento. Sensor N31. Perimetral detrás izquierda. Registro de datos.



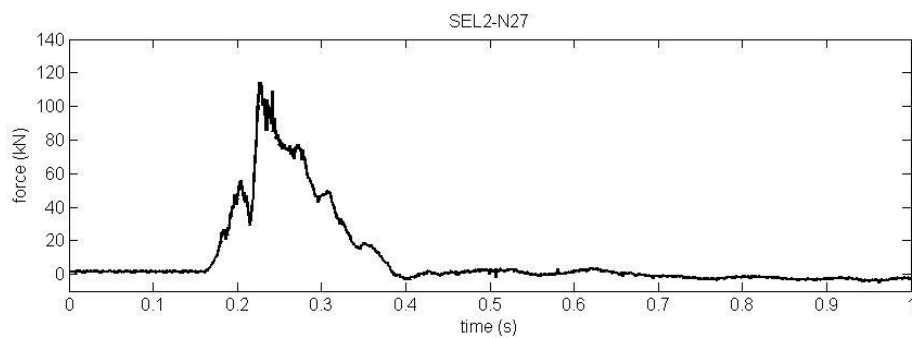
2º Lanzamiento. Sensor N6. Perimetral delante izquierda. Registro de datos.



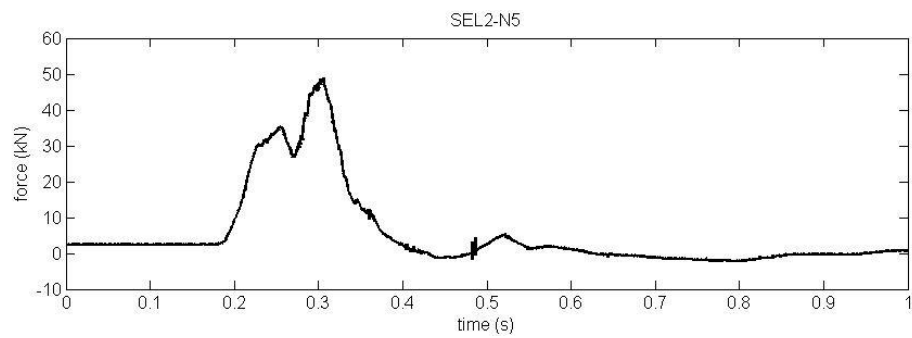
2º Lanzamiento. Sensor N22. Perimetral delante derecha. Registro de datos.



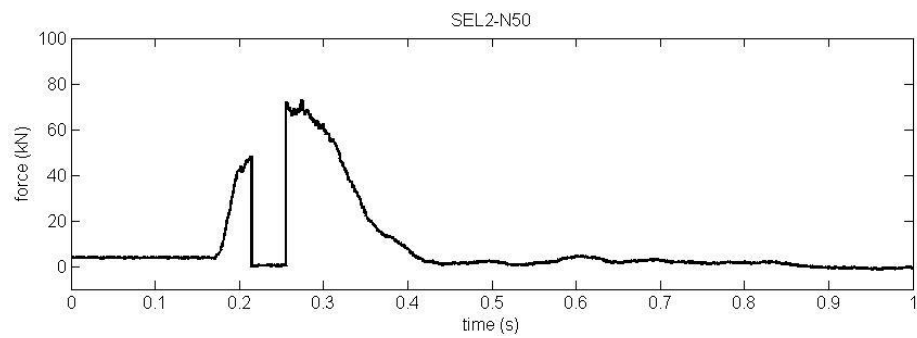
2º Lanzamiento. Sensor N27. Perimetral detrás derecha. Registro de datos.



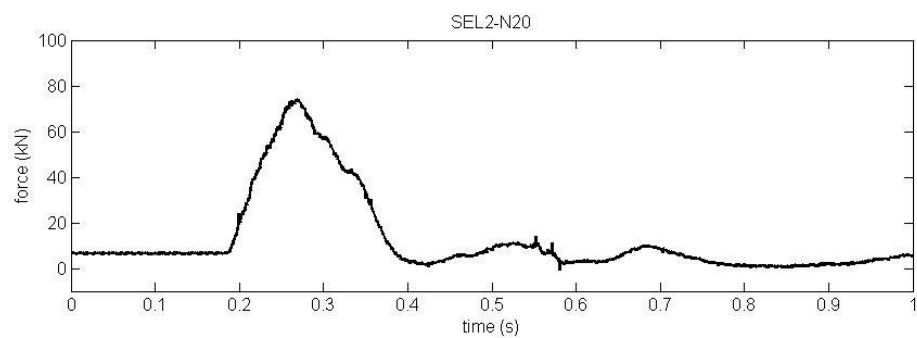
2º Lanzamiento. Sensor N5. Viento superior derecha. Registro de datos.



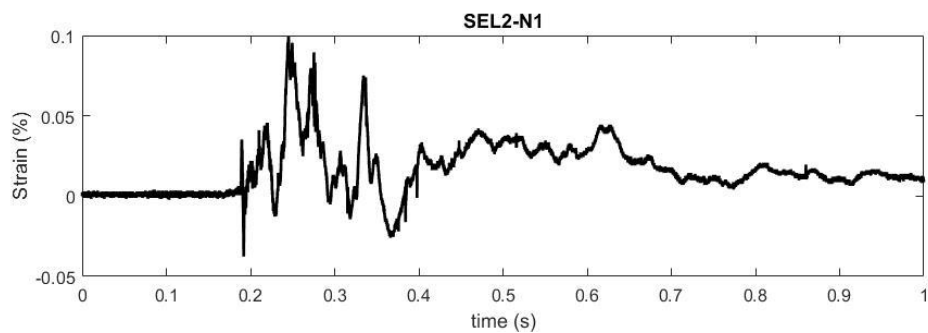
2º Lanzamiento. Sensor N50. Viento lateral detrás derecha. Registro de datos.



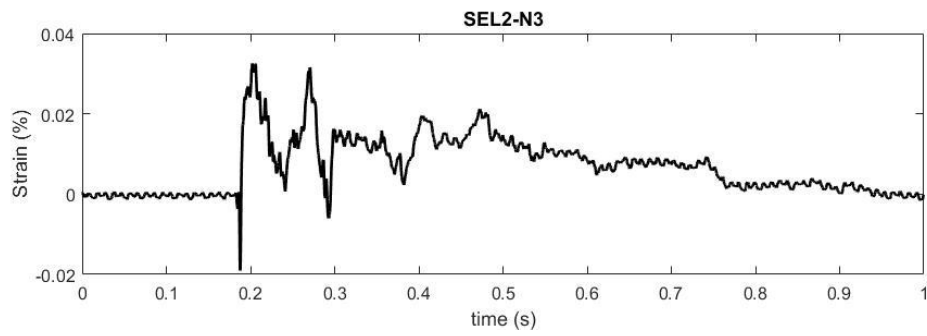
2º Lanzamiento. Sensor N20. Viento lateral delante derecha. Registro de datos.



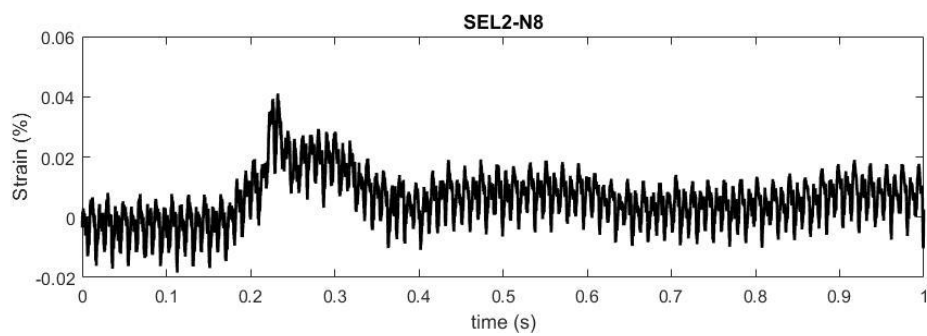
2º Lanzamiento. Galgas N1. Paño central izquierda detrás. Registro de datos.



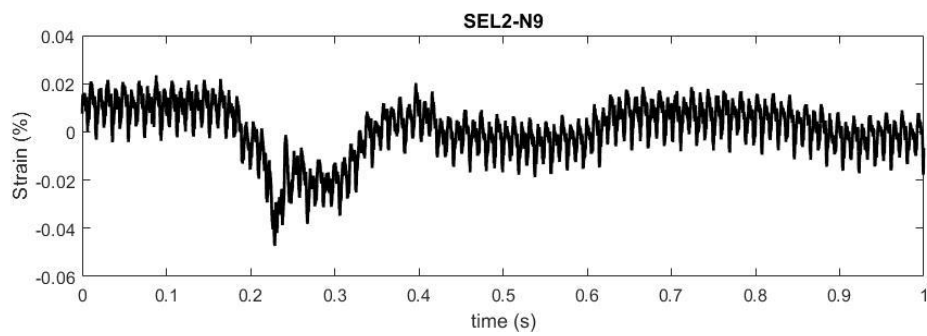
2º Lanzamiento. Galgas N3. Paño central derecha delante. Registro de datos.



2º Lanzamiento. Galga N8. Parte superior del bulón. Registro de datos.



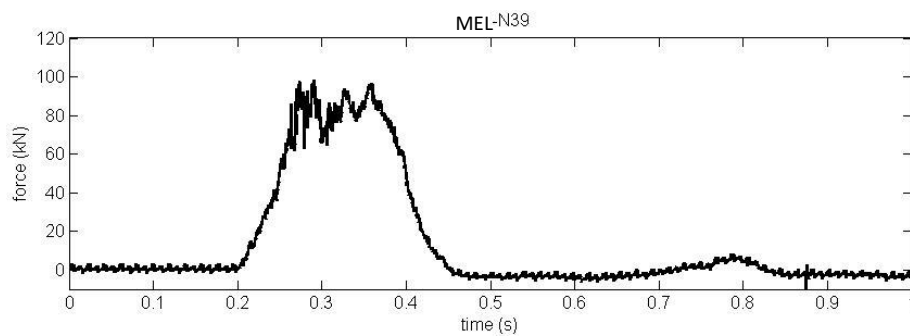
2º Lanzamiento. Galga N9. Parte inferior del bulón. Registro de datos.



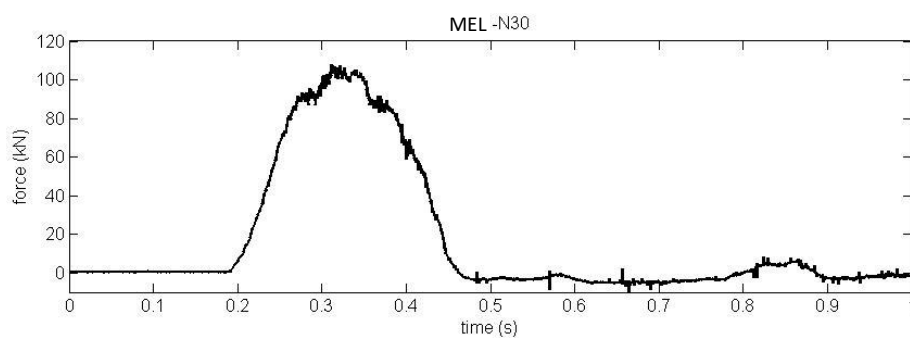
Tercer lanzamiento: MEL

Se adjuntan a continuación los registros continuos de todos los sensores durante el 3^{er} Lanzamiento. Se representa en el eje y la magnitud física versus tiempo en el eje x.

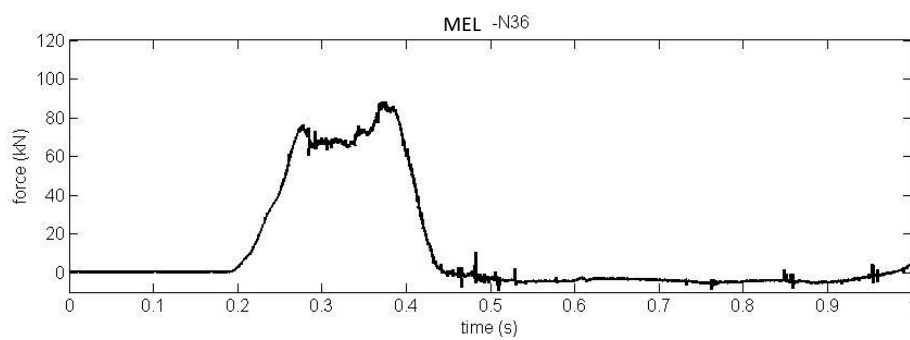
3^o Lanzamiento. Sensor N39. Viento lateral detrás izquierda. Registro de datos.



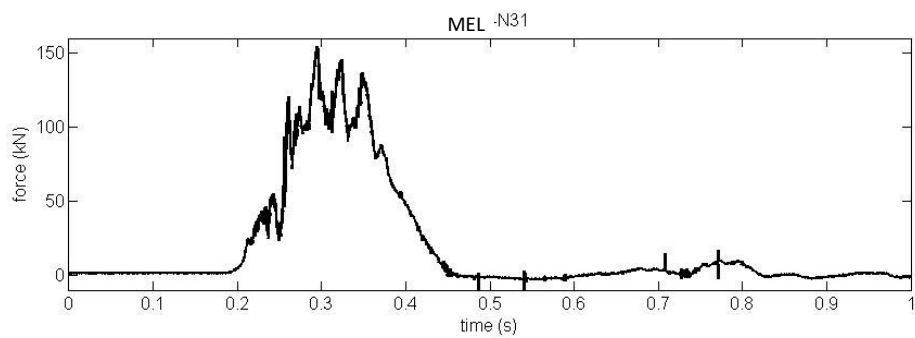
3^{er} Lanzamiento. Sensor N30. Viento lateral delante izquierda. Registro de datos.



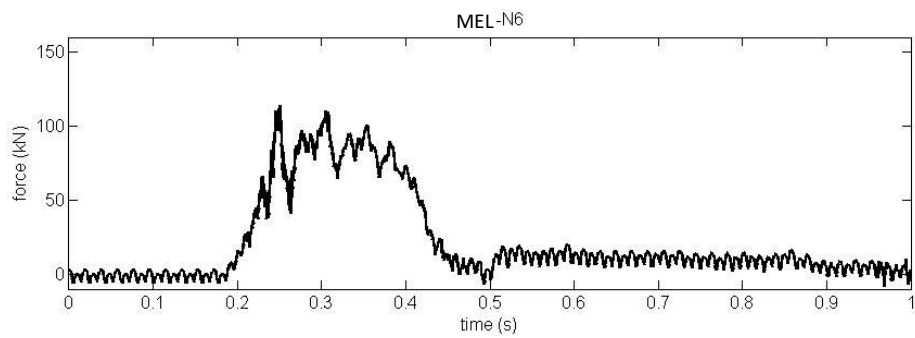
3^{er} Lanzamiento. Sensor N36. Viento superior izquierda. Registro de datos.



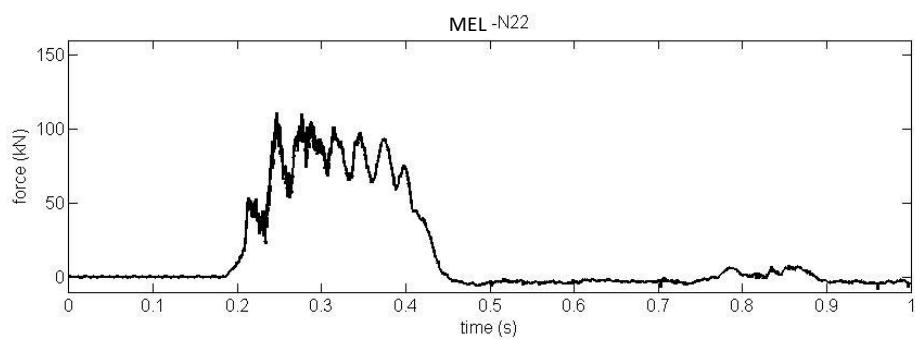
3^{er} Lanzamiento. Sensor N31. Perimetral detrás izquierda. Registro de datos.



3^{er} Lanzamiento. Sensor N6. Perimetral delante izquierda. Registro de datos.

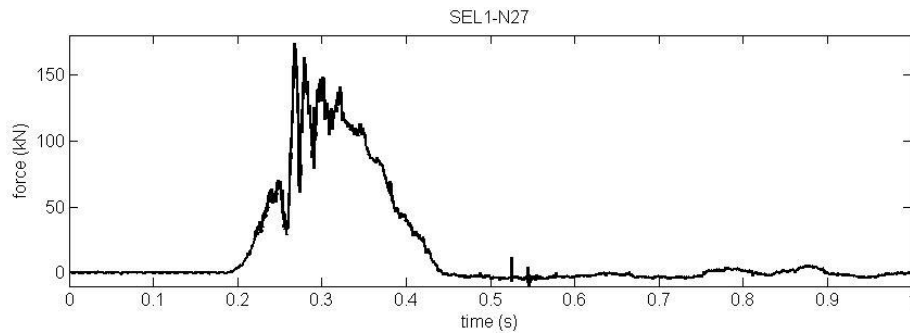


3^{er} Lanzamiento. Sensor N22. Perimetral delante derecha. Registro de datos.

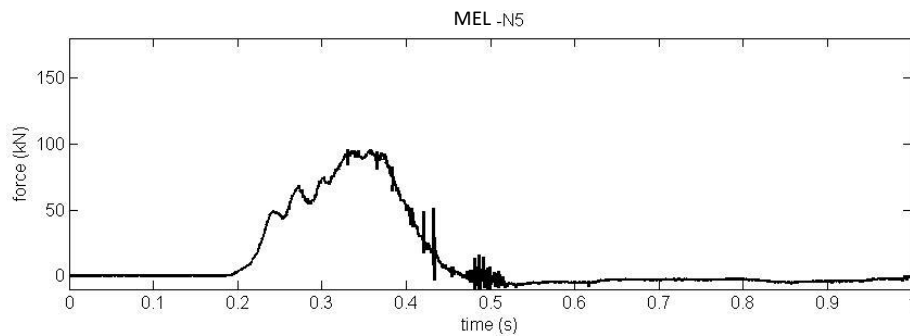


3^{er} Lanzamiento. Sensor N27. Perimetral detrás derecha. Registro de datos.

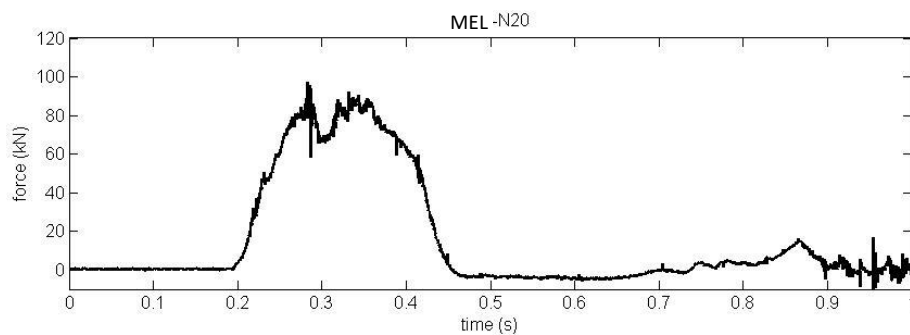
MEL



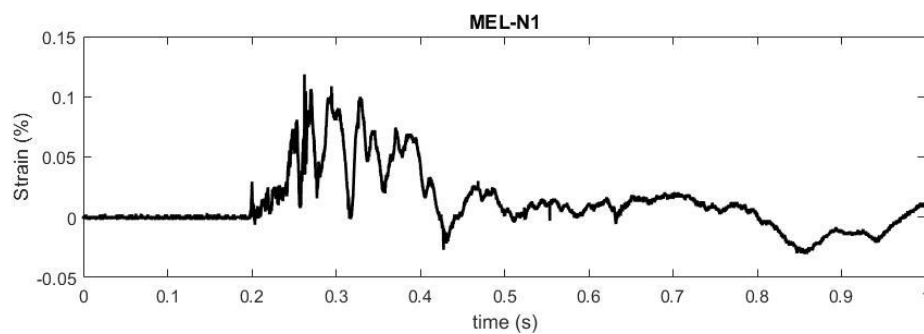
3^{er} Lanzamiento. Sensor N5. Viento superior derecha. Registro de datos.



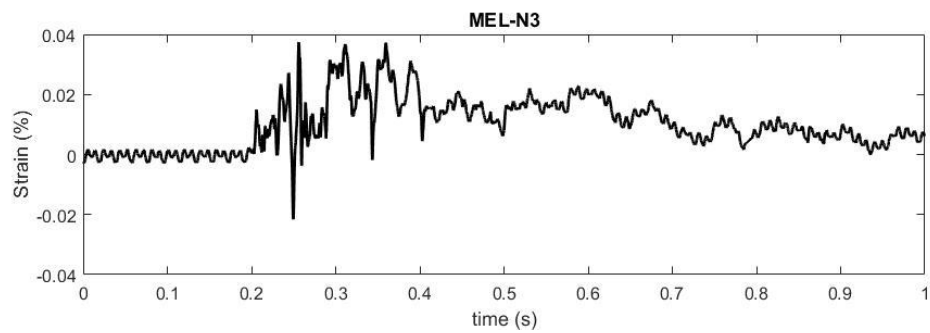
3^{er} Lanzamiento. Sensor N20. Viento lateral delante derecha. Registro de datos.



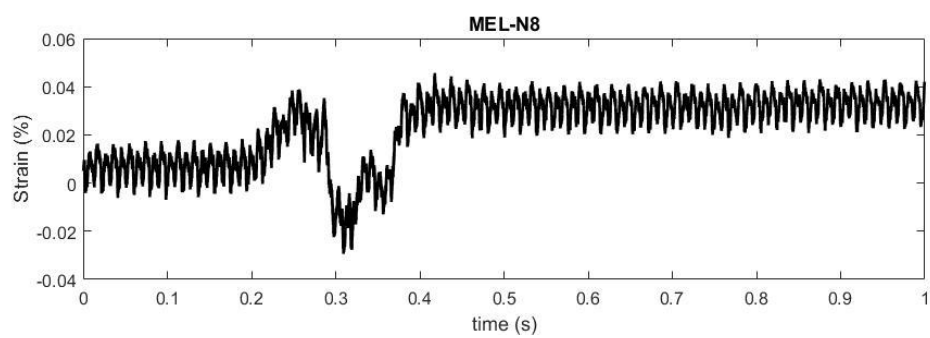
3^{er} Lanzamiento. Galgas N1. Paño centra izquierda detrás. Registro de datos.



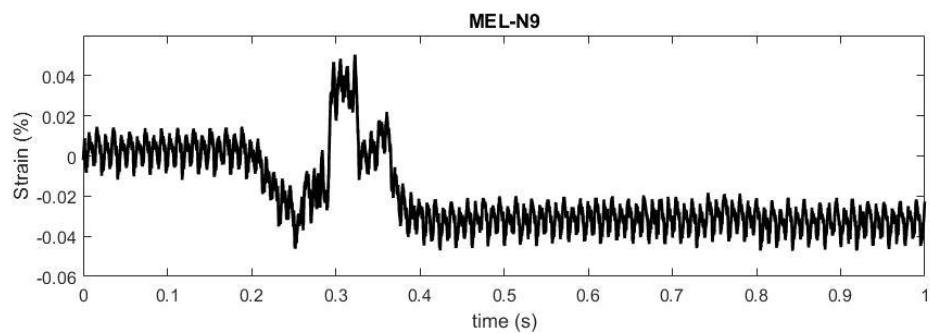
3^{er} Lanzamiento. Galgas N3. Paño centra derecha delante. Registro de datos.



3^{er} Lanzamiento. Galgas N8. Parte superior del bulón. Registro de datos.



3^{er} Lanzamiento. Galgas N9. Parte inferior del bulón. Registro de datos.

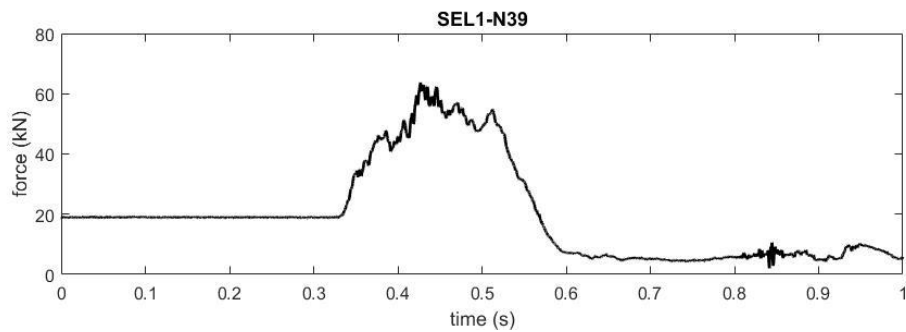


PANTALLA DE 500 kJ

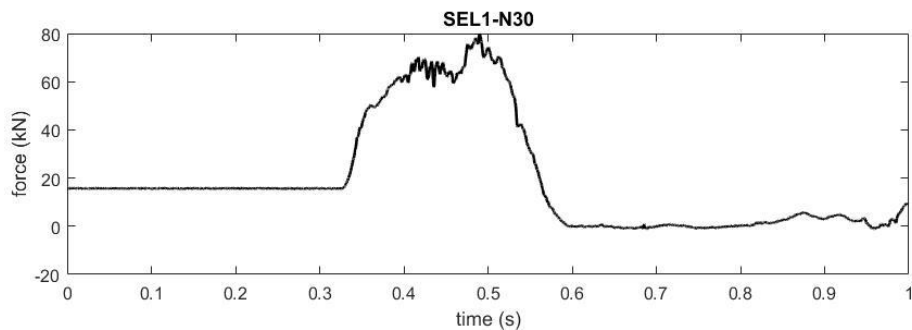
Primer lanzamiento: SEL 1

Se adjuntan a continuación los registros continuos de todos los sensores durante el 1^{er} Lanzamiento. Se representa en el eje y la magnitud física versus tiempo en el eje x.

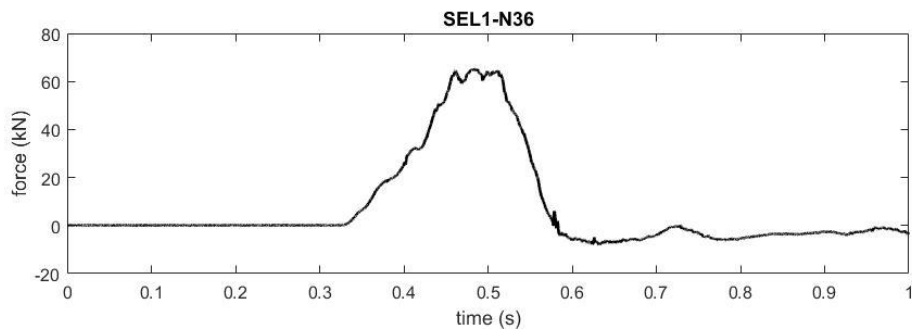
1^{er} Lanzamiento. Sensor N39. Viento lateral detrás izda. Registro de datos.



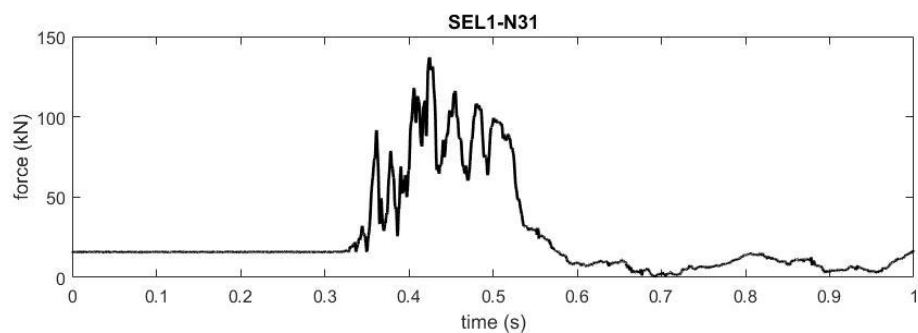
1^{er} Lanzamiento. Sensor N30. Viento lateral delante izda. Registro de datos.



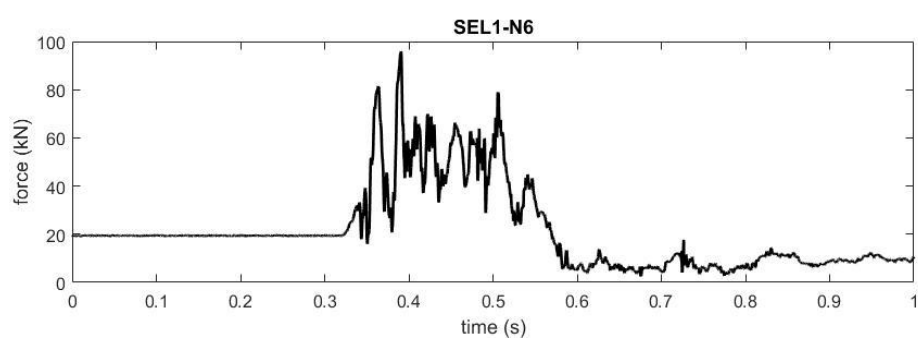
1^{er} Lanzamiento. Sensor N36. Viento superior izda. Registro de datos.



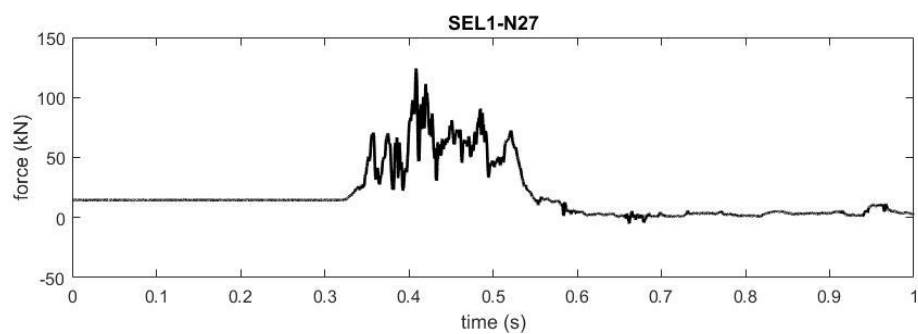
1^{er} Lanzamiento. Sensor N31. Perimetral detrás izda. Registro de datos.



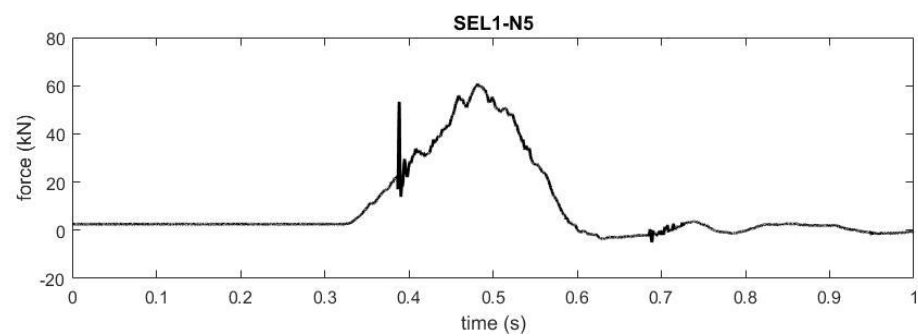
1^{er} Lanzamiento. Sensor N6. Perimetral delante izda. Registro de datos.



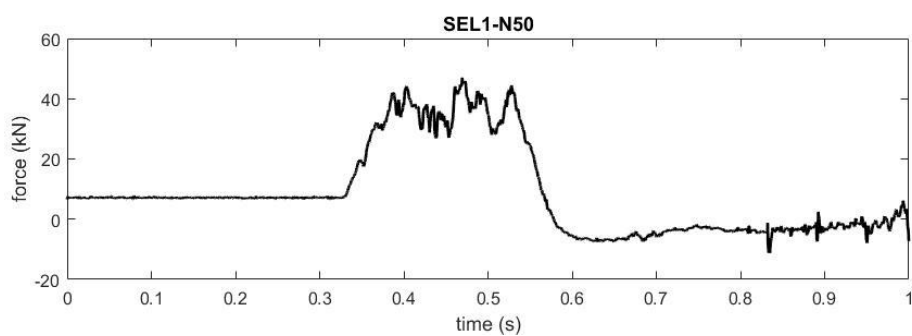
1^{er} Lanzamiento. Sensor N27. Perimetral detrás derecha. Registro de datos.



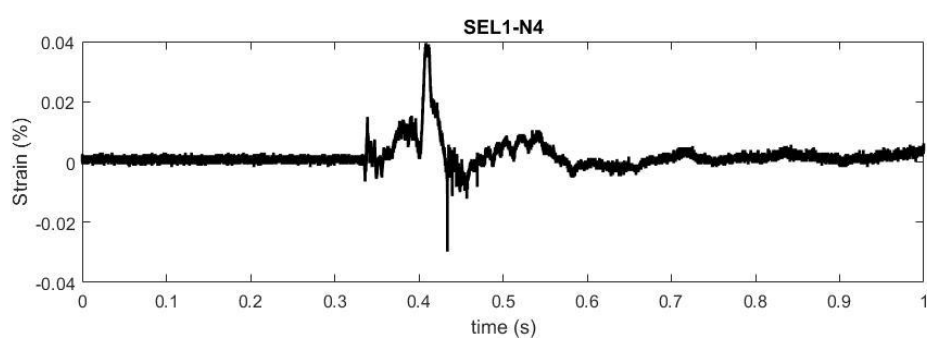
1^{er} Lanzamiento. Sensor N5. Viento superior izda. Registro de datos.



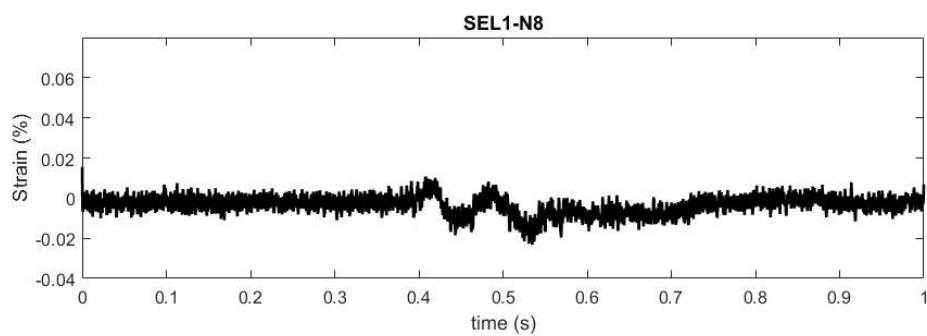
1^{er} Lanzamiento. Sensor N50. Viento lateral detrás dcha. Registro de datos.



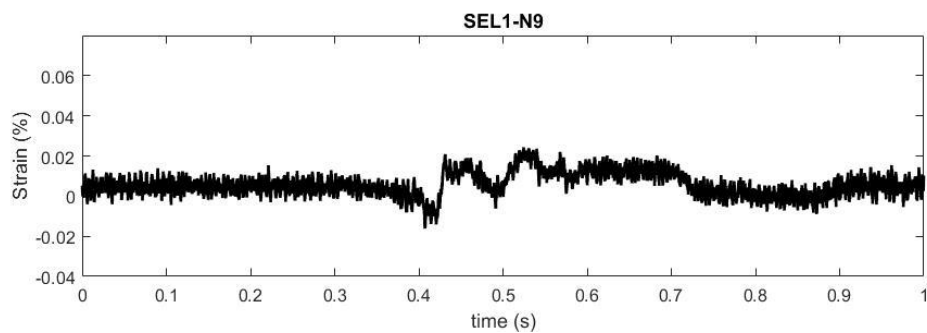
1^{er} Lanzamiento. Galgas N4. Paño central derecha detrás. Registro de datos.



1^{er} Lanzamiento. Galga N8. Parte superior del bulón. Registro de datos.



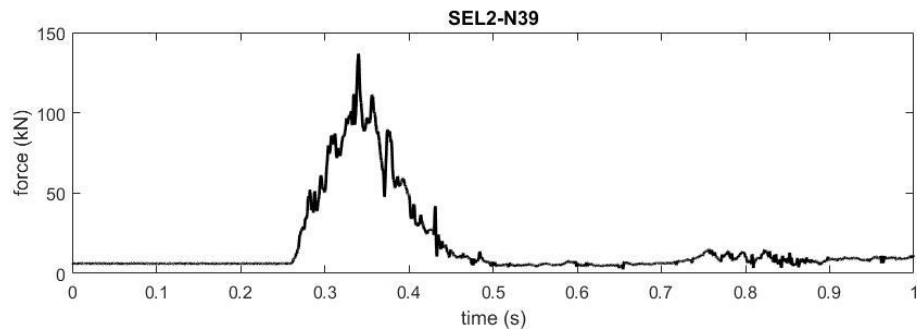
1^{er} Lanzamiento. Galga N9. Parte inferior del bulón. Registro de datos.



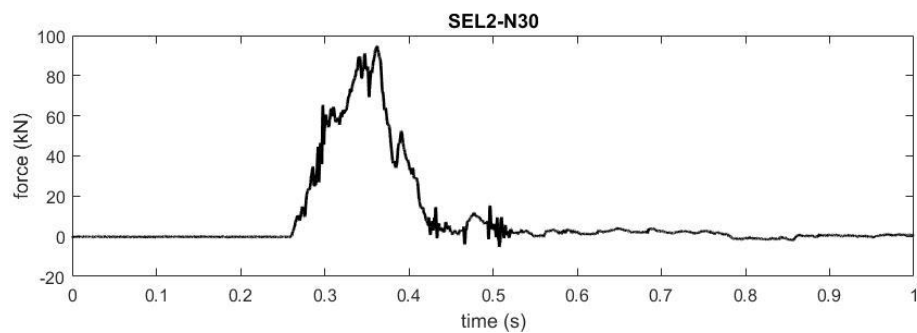
Segundo lanzamiento: SEL 2

Se adjuntan a continuación los registros continuos de todos los sensores durante e 2º Lanzamiento. Se representa en el eje y la magnitud física versus tiempo en el eje x.

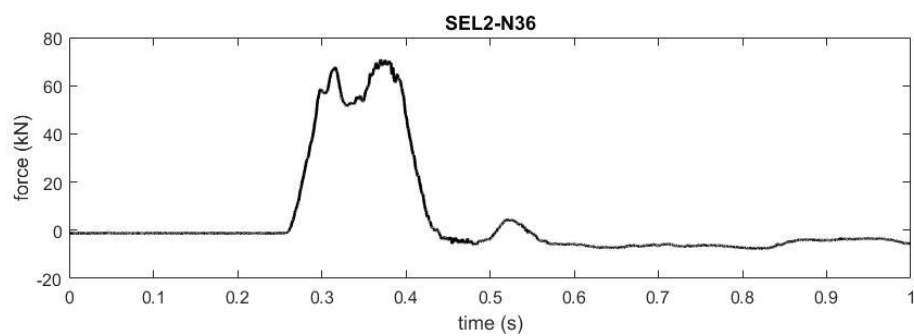
2º Lanzamiento. Sensor N39. Viento lateral detrás izda. Registro de datos.



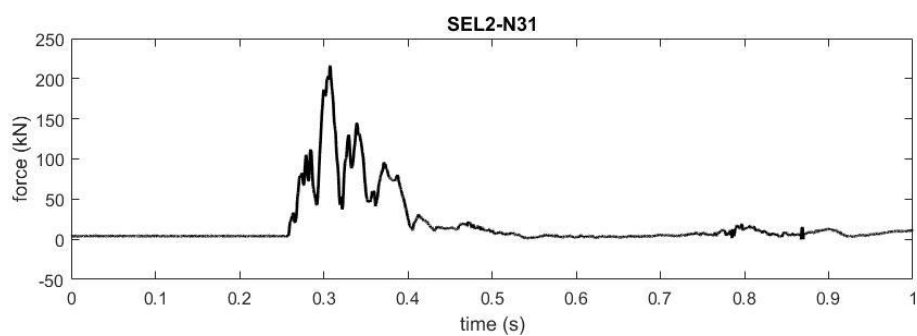
2º Lanzamiento. Sensor N30. Viento lateral delante izda. Registro de datos.



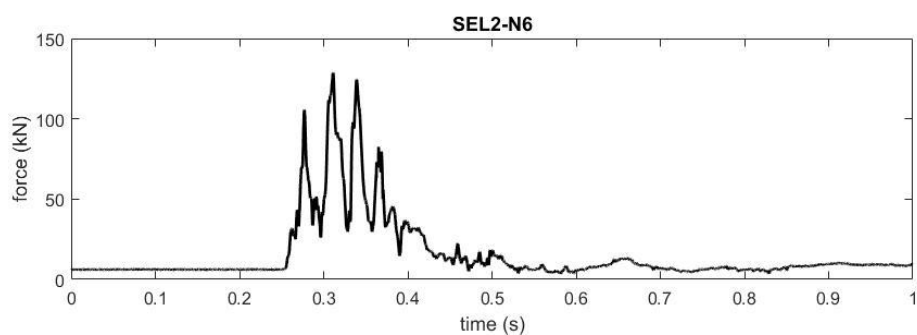
2º Lanzamiento. Sensor N36. Viento superior izda. Registro de datos.



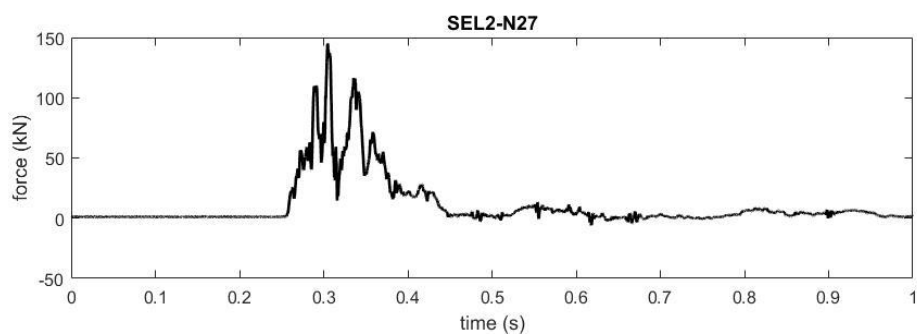
2º Lanzamiento. Sensor N31. Perimetral detrás izda. Registro de datos.



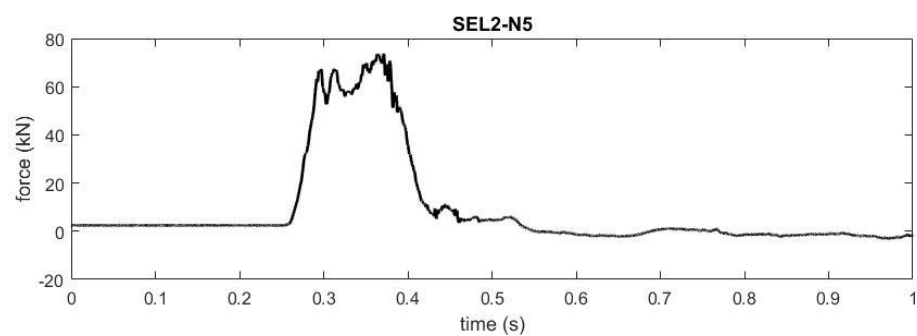
2º Lanzamiento. Sensor N6. Perimetral delante izda. Registro de datos.



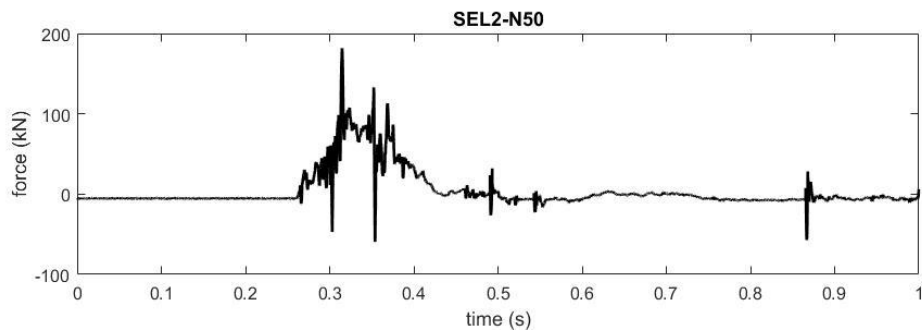
2º Lanzamiento. Sensor N27. Perimetral detrás derecha. Registro de datos.



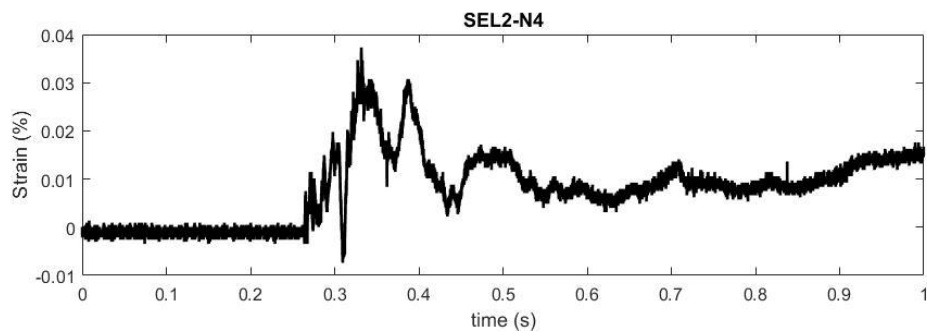
2º Lanzamiento. Sensor N5. Viento superior izda. Registro de datos.



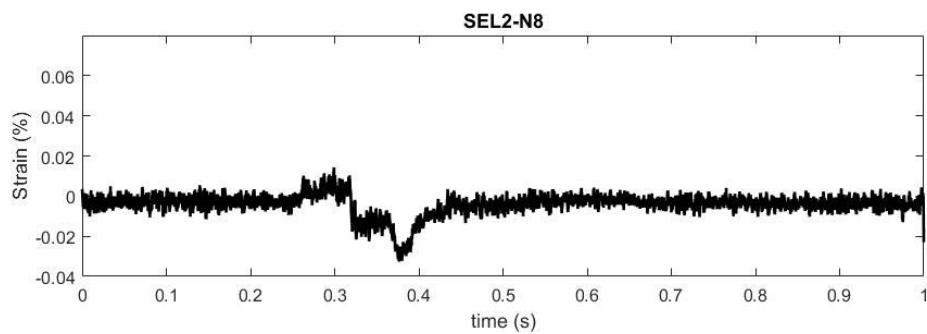
2º Lanzamiento. Sensor N50. Viento lateral detrás dcha. Registro de datos.



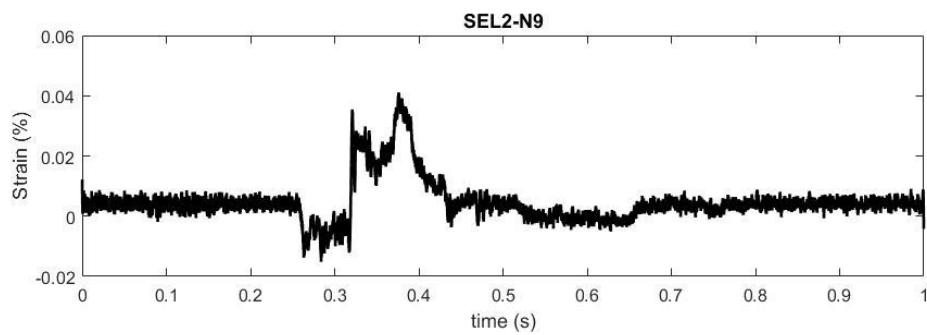
2º Lanzamiento. Galgas N4. Paño central derecha detrás. Registro de datos.



2º Lanzamiento. Galga N8. Parte superior del bulón. Registro de datos.



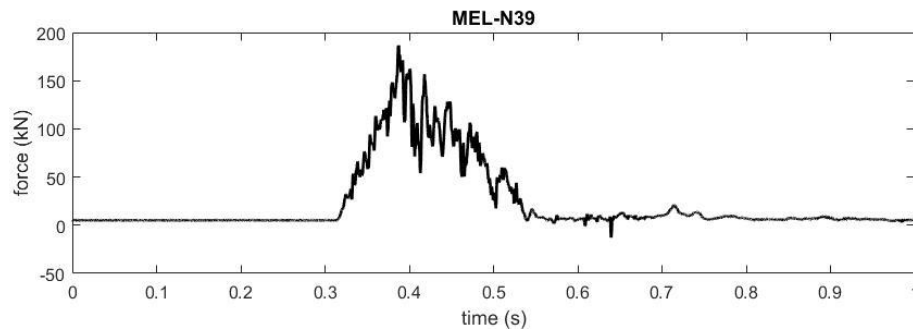
2º Lanzamiento. Galga N9. Parte inferior del bulón. Registro de datos.



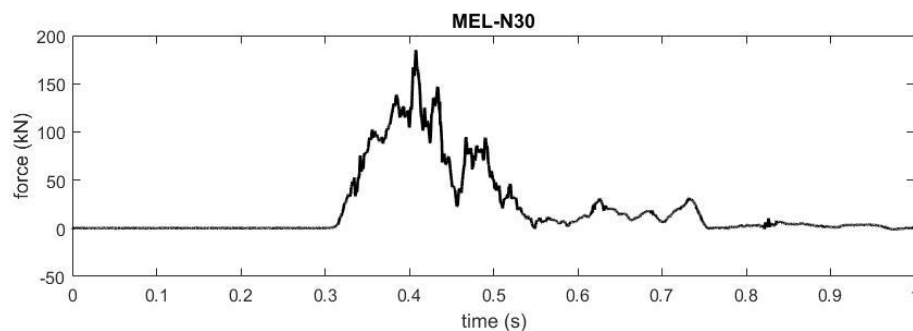
Tercer lanzamiento: MEL

Se adjuntan a continuación los registros continuos de todos los sensores durante el 3^{er} Lanzamiento. Se representa en el eje y la magnitud física versus tiempo en el eje x.

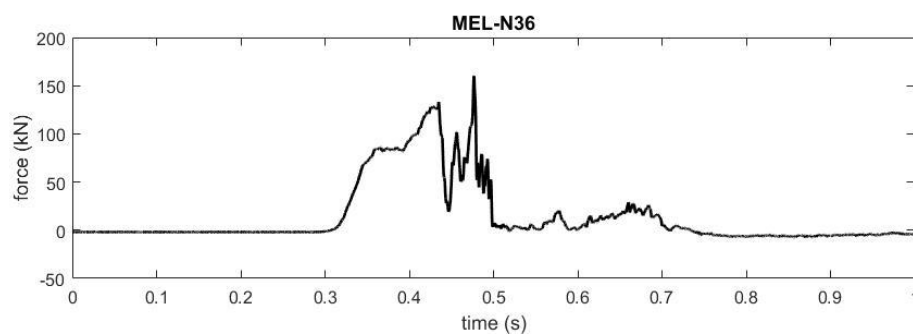
3^{er} Lanzamiento. Sensor N39. Viento lateral detrás izda. Registro de datos.



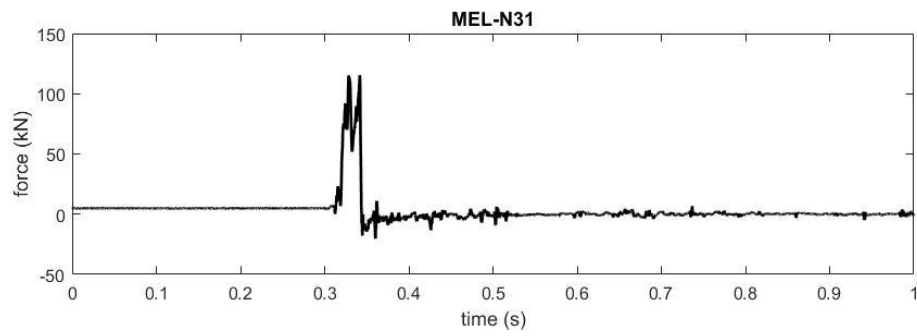
3^{er} Lanzamiento. Sensor N30. Viento lateral delante izda. Registro de datos.



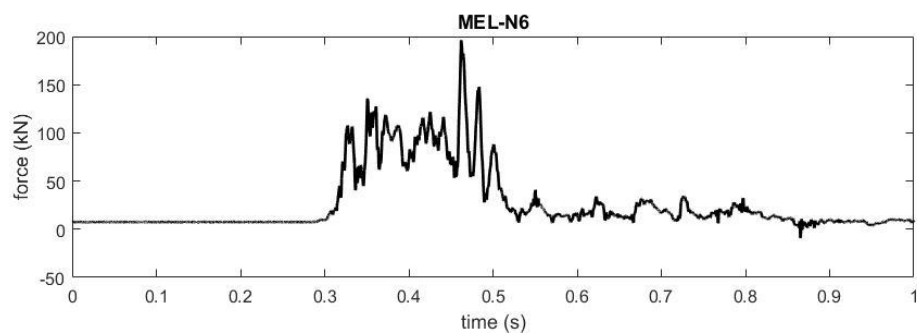
3^{er} Lanzamiento. Sensor N36. Viento superior izda. Registro de datos.



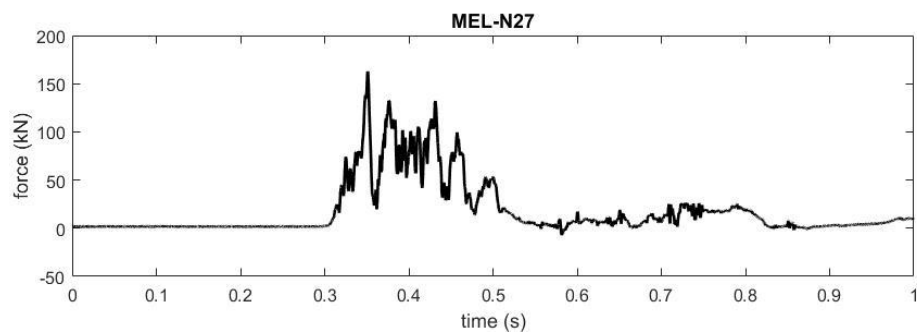
3^{er} Lanzamiento. Sensor N31. Perimetral detrás izda. Registro de datos.



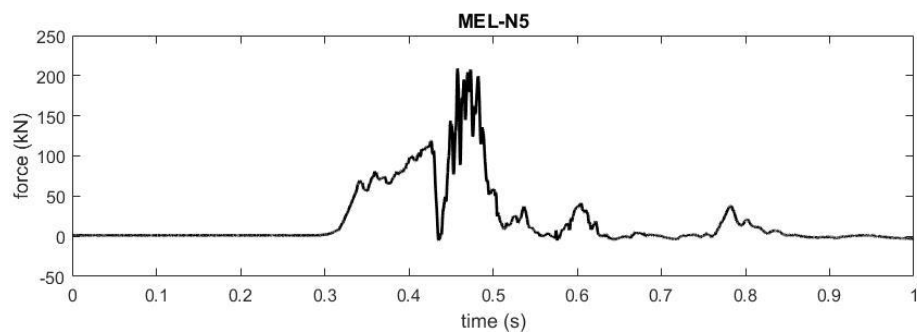
3^{er} Lanzamiento. Sensor N6. Perimetral delante izda. Registro de datos.



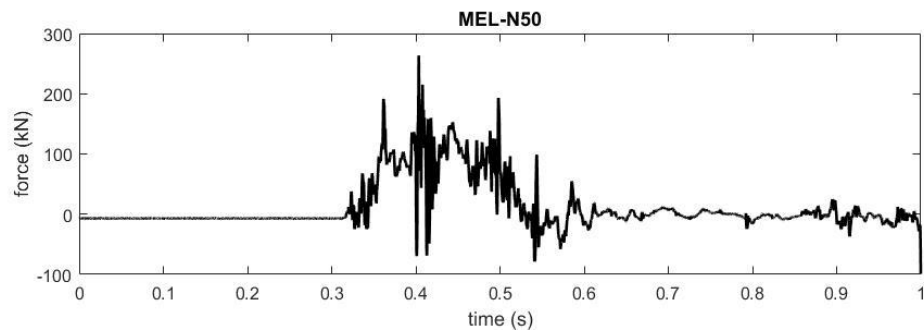
3^{er} Lanzamiento. Sensor N27. Perimetral detrás derecha. Registro de datos.



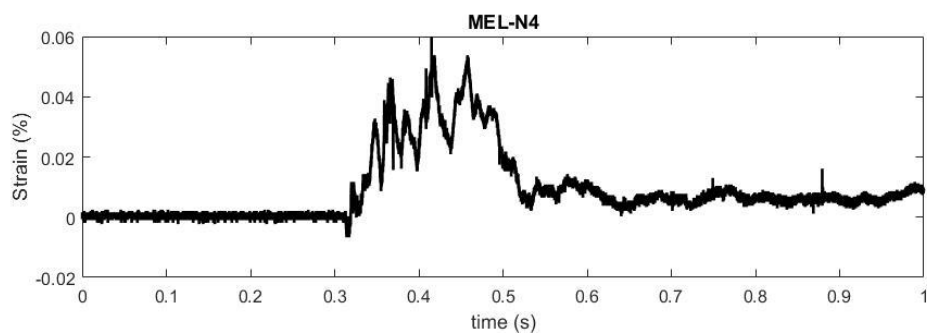
3^{er} Lanzamiento. Sensor N5. Viento superior izda. Registro de datos.



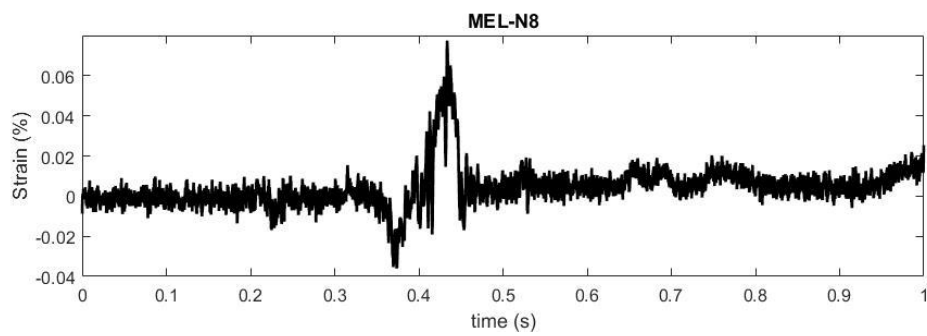
3º Lanzamiento. Sensor N50. Viento lateral detrás dcha. Registro de datos.



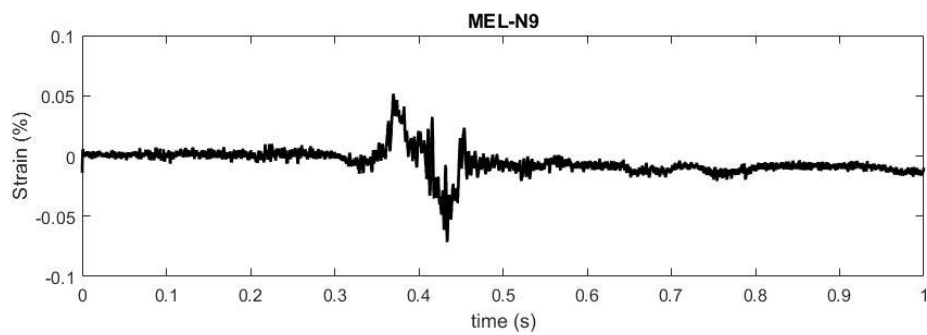
3º Lanzamiento. Galgas N4. Paño central derecha detrás. Registro de datos.



3º Lanzamiento. Galga N8. Parte superior del bulón. Registro de datos.



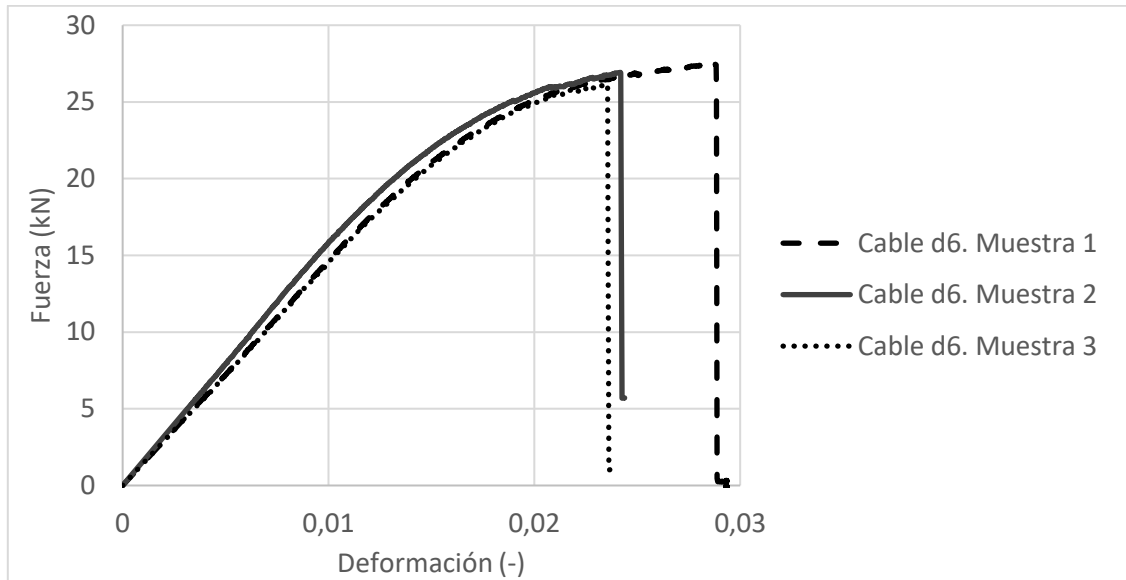
3º Lanzamiento. Galga N9. Parte inferior del bulón. Registro de datos.



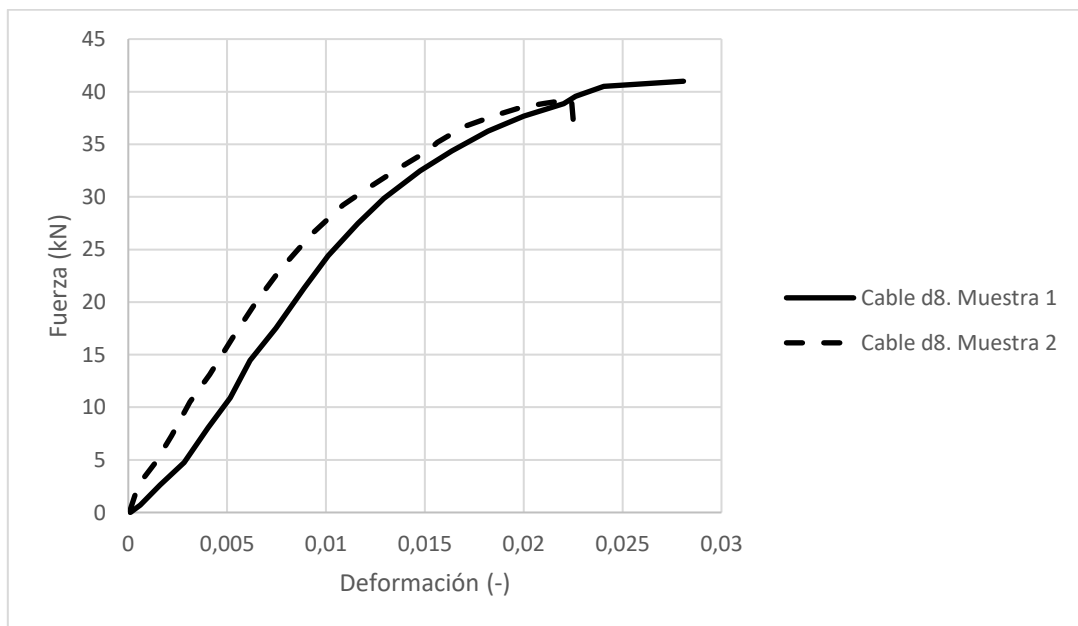
ANEXO III

Ensayos de tracción a los cables

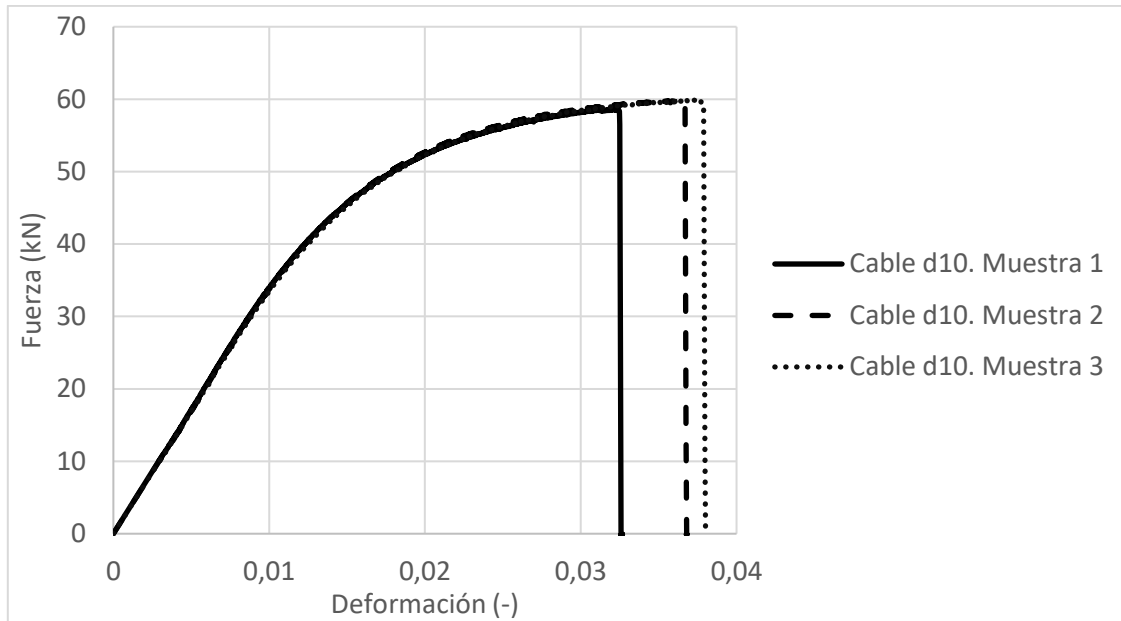
Cable diámetro 6 mm



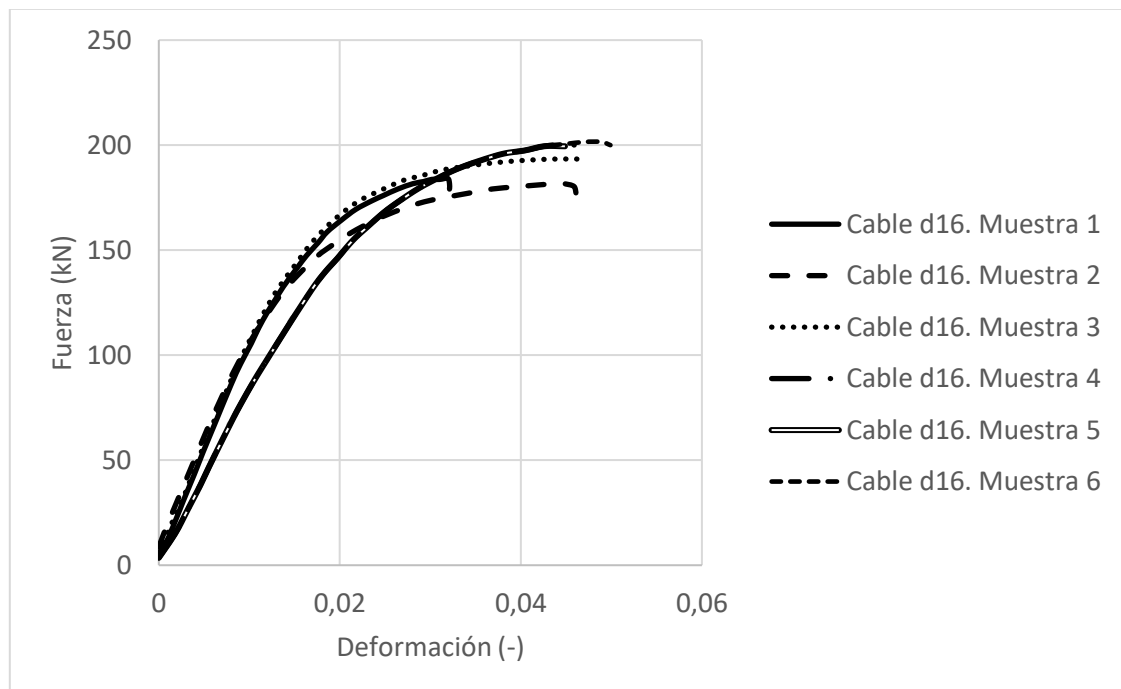
Cable diámetro 8 mm



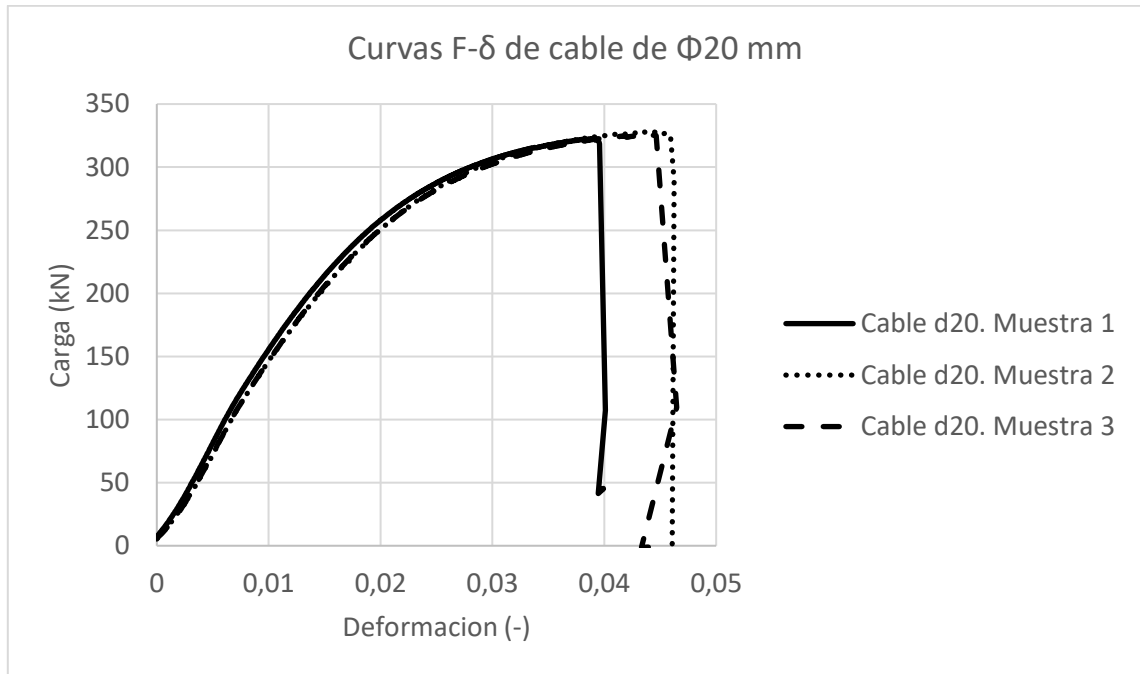
Cable diámetro 10 mm



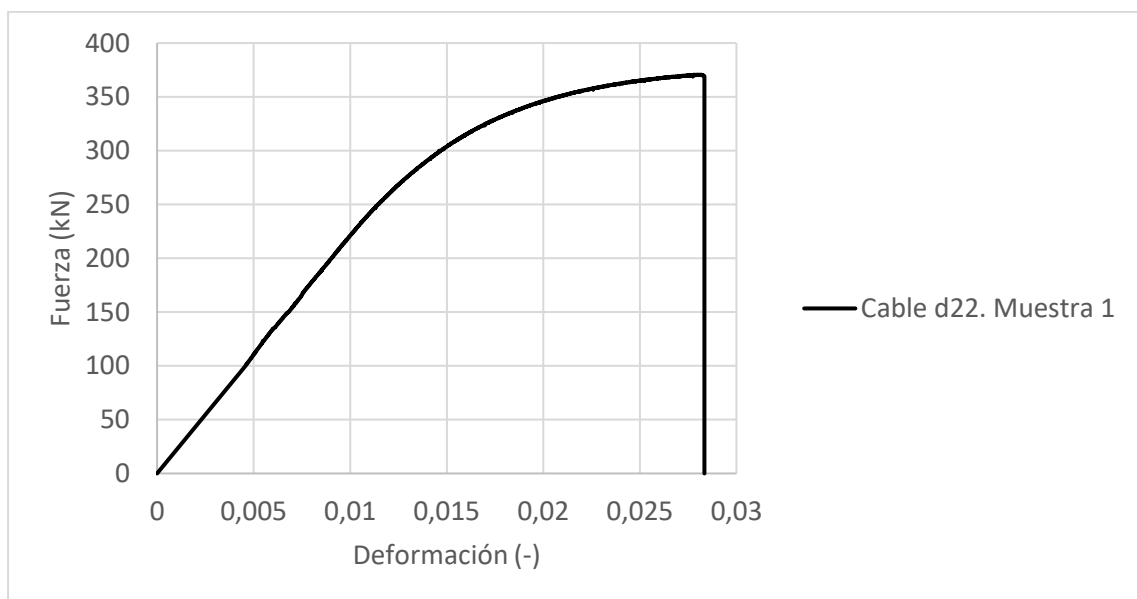
Cable diámetro 16 mm



Cable diámetro 20 mm



Cable diámetro 22 mm

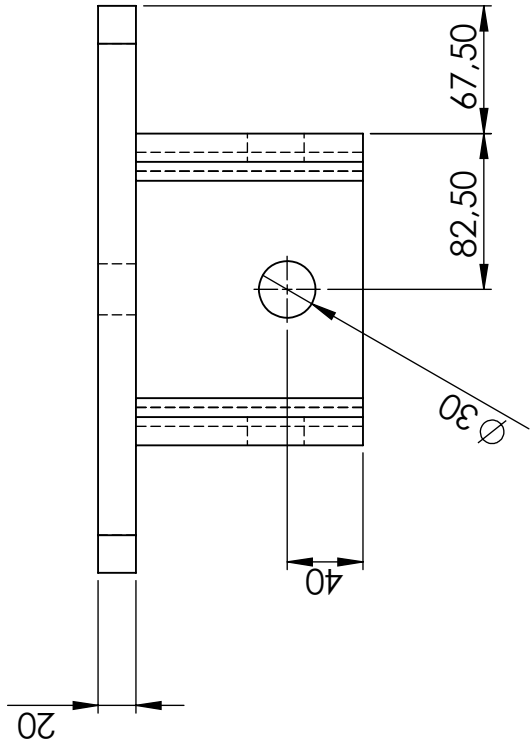
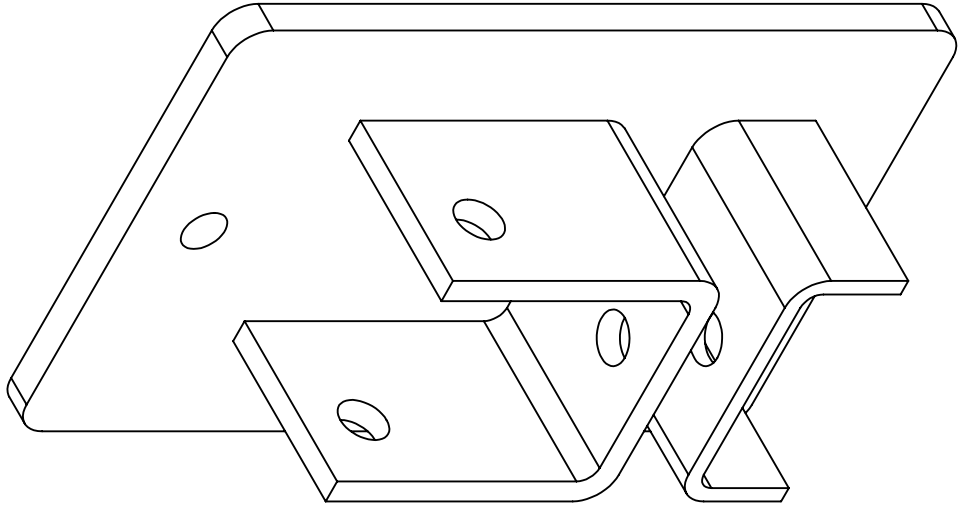
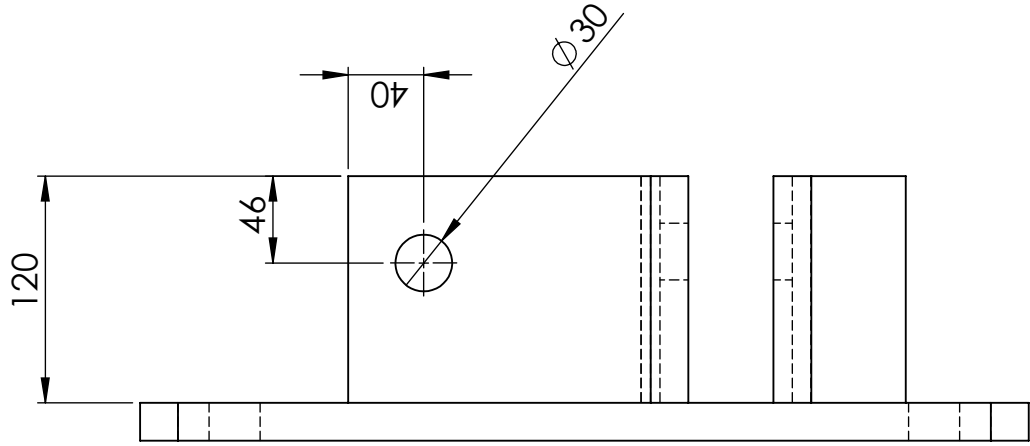
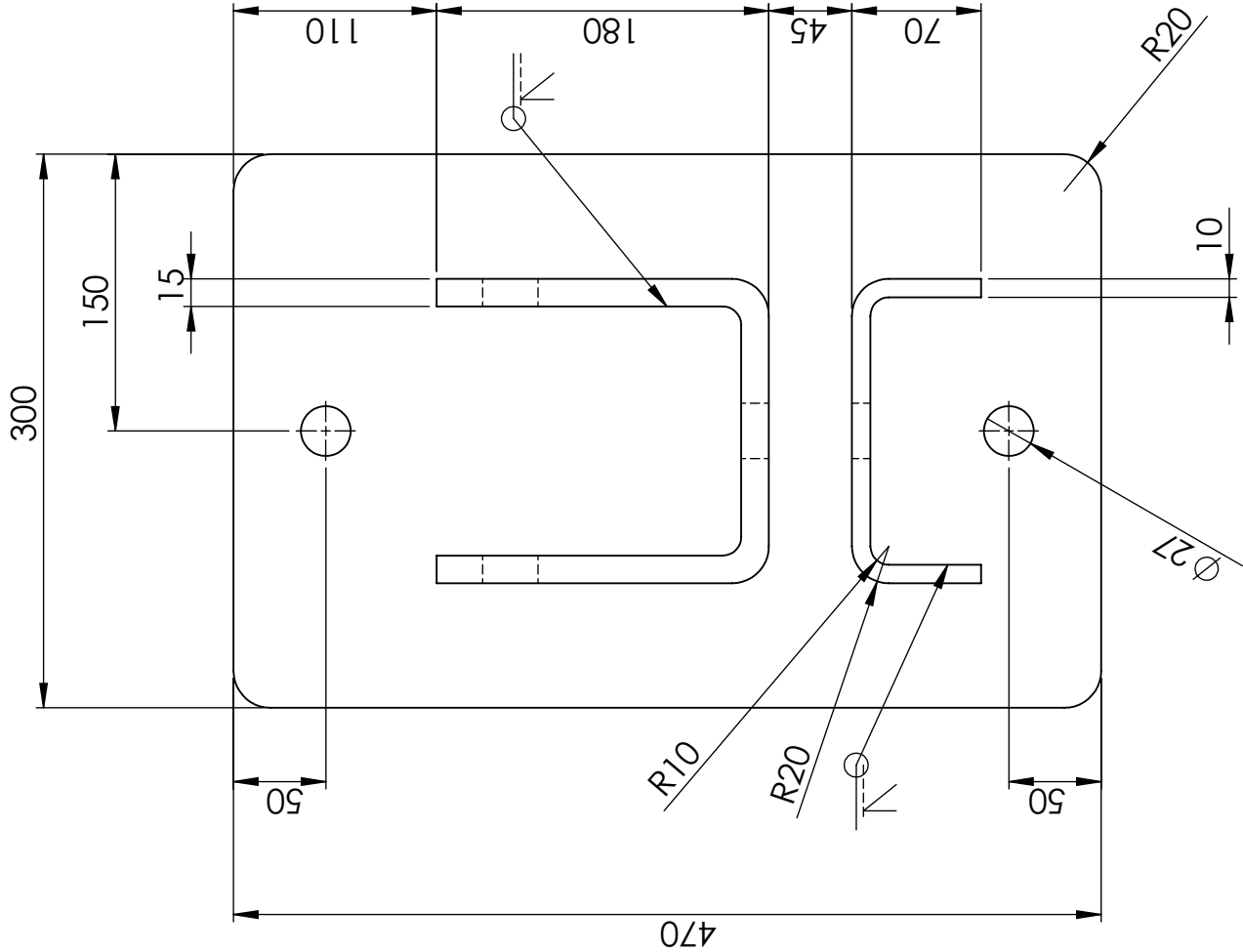


ANEXO IV


Planos de la pantalla final

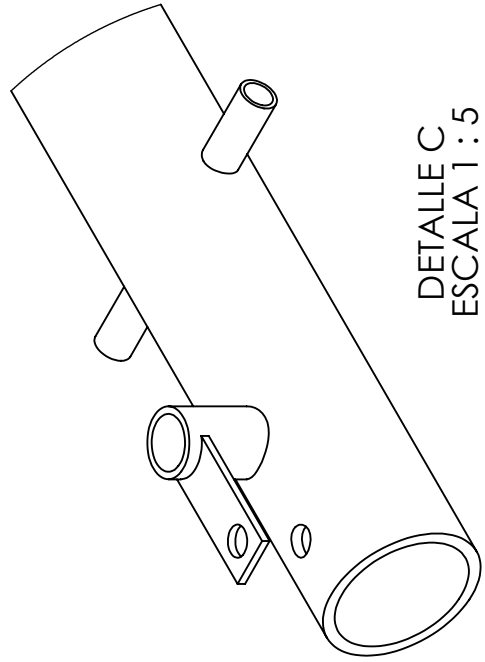


PLANOS DE FABRICACIÓN **ELEMENTOS PANTALLA DINÁMICA**

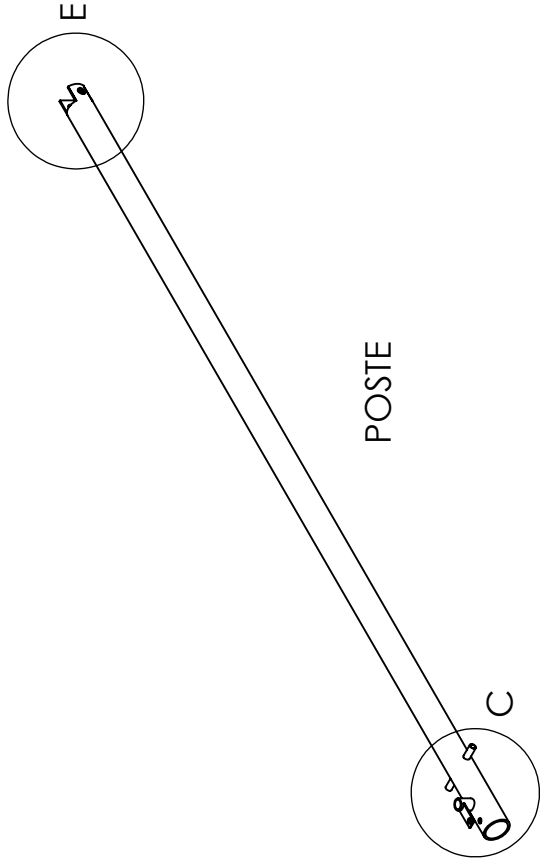


Nota - Una vez eliminadas las imperfecciones de las piezas, se le dará una imprimación de epoxi poliamida, una capa intermedia y el acabado con esmalte epoxi.

| | | | | | |
|---|--|--|--|------------------------|--|
|  | | Si no se indica lo contrario las cotas se expresan en mm | | TÍTULO: ANCLAJE | |
| MATERIAL: Acero de calidad S275 | | ACABADO: Rebarbar y romper aristas vivas. Ver nota referente a pintura | | N.º DE DIBUJO: Plano 1 | |
| DIBUJ. NOMBRE Carlos Real Gutiérrez | | ESCALA: 1/4 | | FECHA: 27/09/2018 | |
| VERIF. Laura Castañón Jano | | | | A4 | |
| APROB. Elena Blanco Fernández/Daniel Castro Fresno | | | | | |

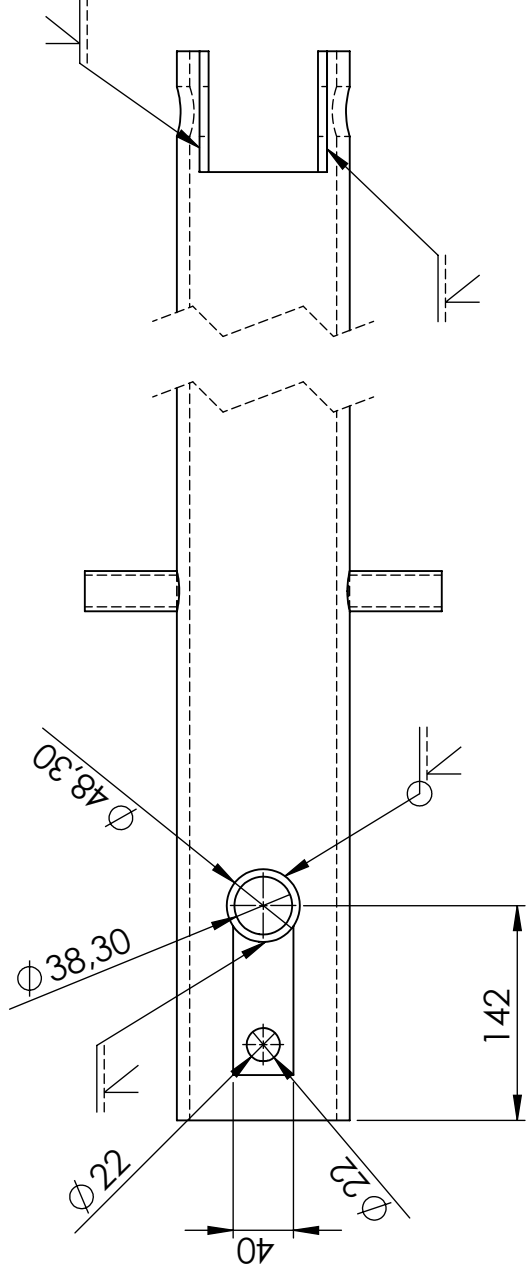
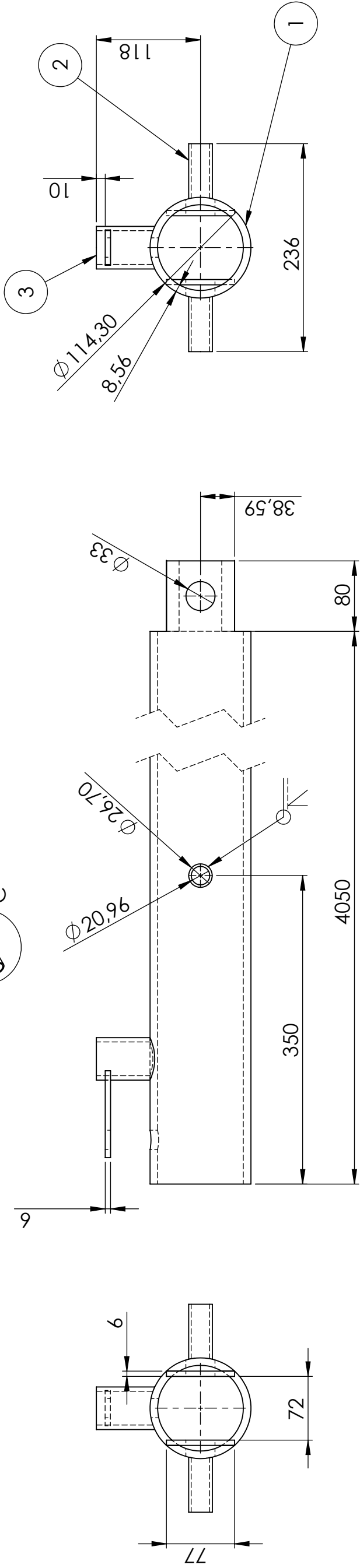


DETALLE C
ESCALA 1 : 5



POSTE

DETALLE E
ESCALA 1 : 5



Nota- Calidades de los tubos 1, 2 y 3 para alternativa A:

- 1 Tubo de diámetro 114,3 mm y espesor 8,56 mm
Acero de calidad A106 suministrado por Arcelor
(Se suministra en barras de 6 metros)
- 2 Tubo de diámetro 36 mm y espesor 6,5 mm
Acero A106Gr B Sch80
- 3 Tubo de diámetro 48,3 mm y espesor 7,1 mm
Acero A106Gr B Sch80

Nota - Una vez eliminadas las imperfecciones de las piezas, se le dará una imprimación de epoxi poliamida, una capa intermedia y el acabado con esmalte epoxi.



| | |
|--------|---|
| DIBUJ. | NOMBRE |
| VERIF. | Carlos Real Gutiérrez |
| APROB. | Laura Castañón Jara |
| | Elena Blanco Fernández/Daniel Castro Fresno |

Si no se indica lo contrario las cotas se expresan en mm

MATERIAL:

ACABADO:
Rebarbar y romper aristas vivas.
Ver nota referente a pintura

TÍTULO:

POSTE ALTERNATIVA A

N.º DE DIBUJO:

Plano 2

A4

ESCALA:

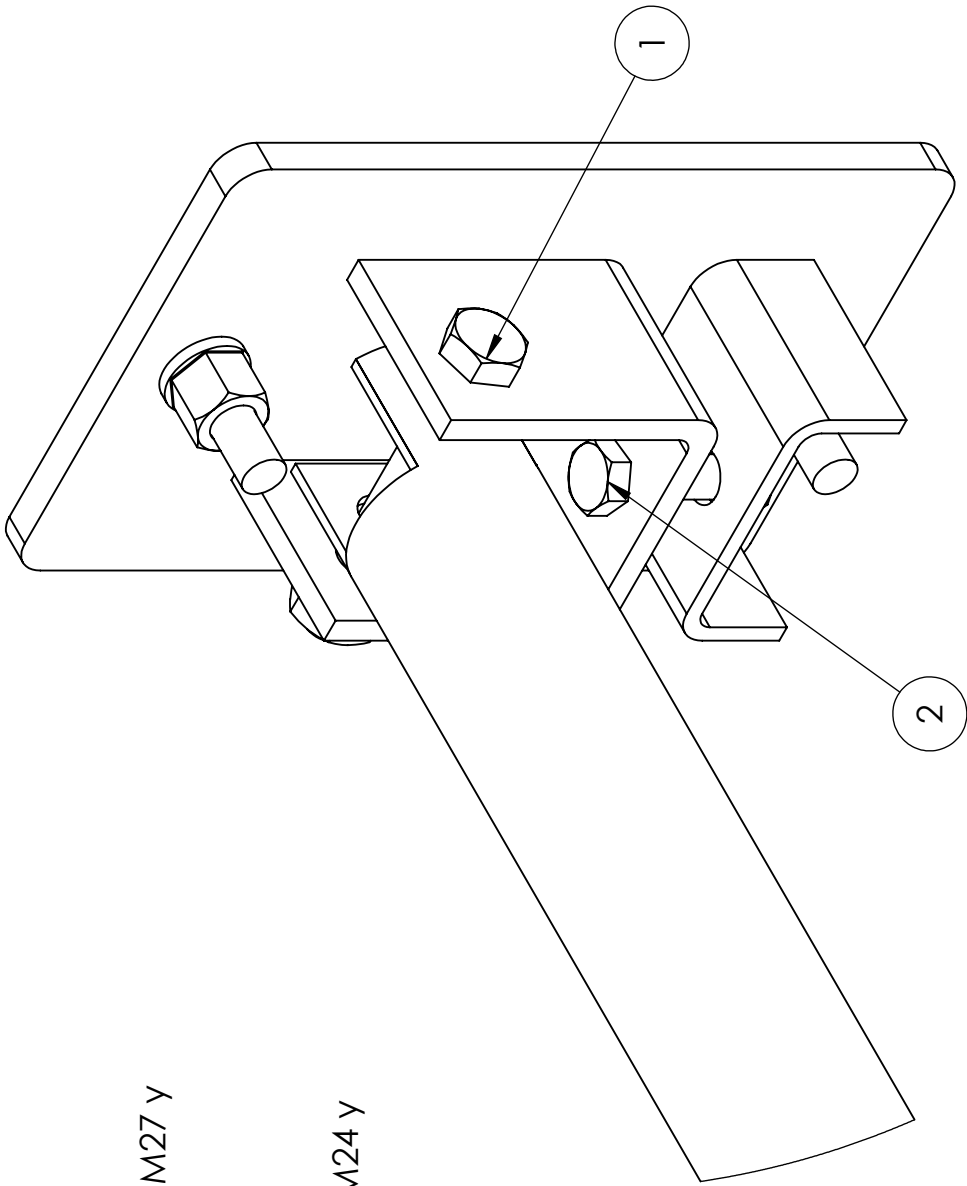
1/5


FECHA:

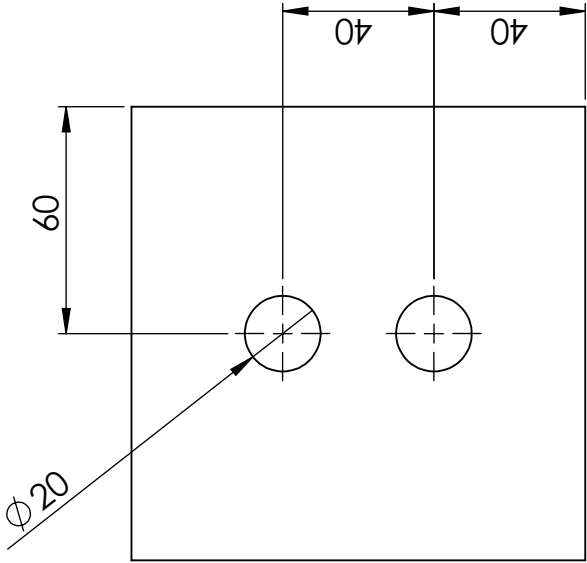
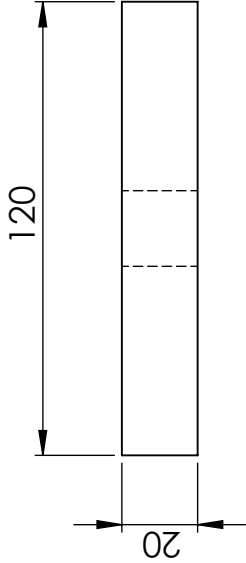
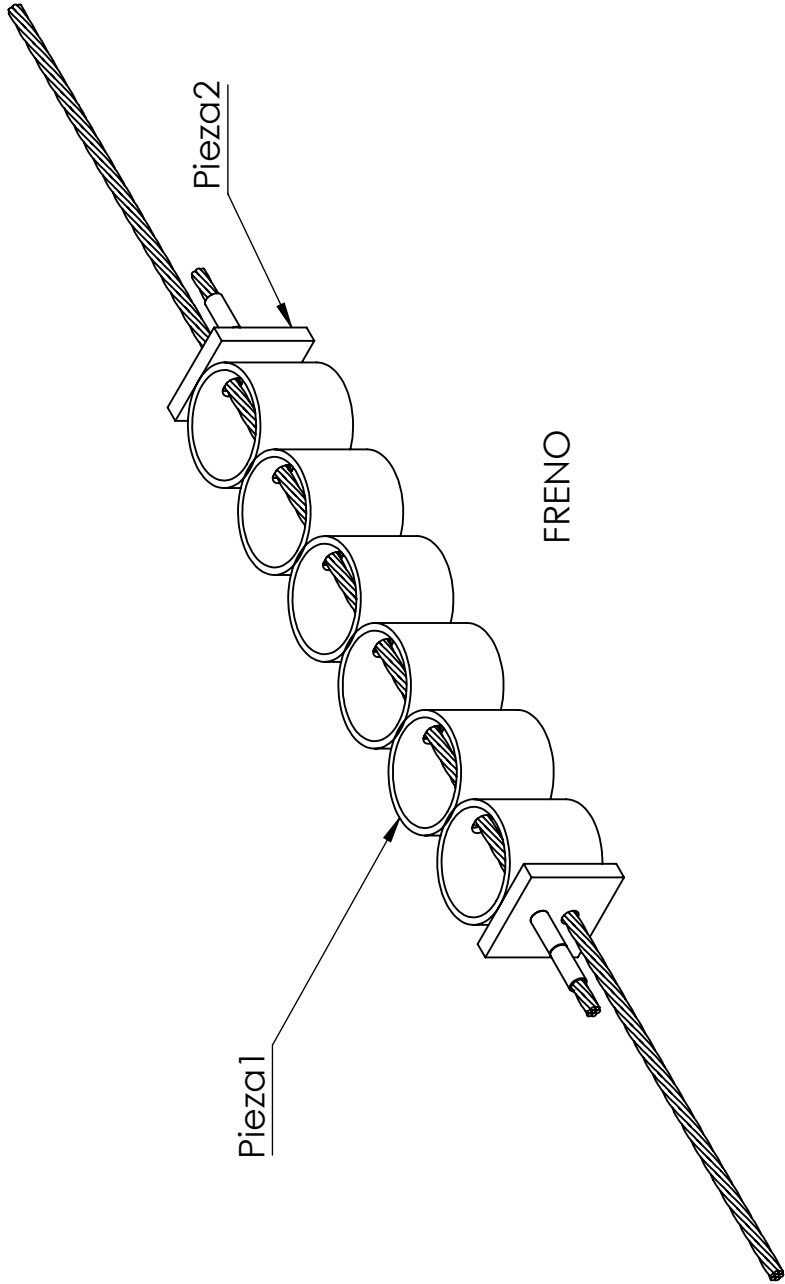
27/09/2018

Para la unión del poste al anclaje se emplea el perno (1) DIN 7990 de M27 y 200mm de longitud, fijado mediante tuerca DIN 24034 de M27

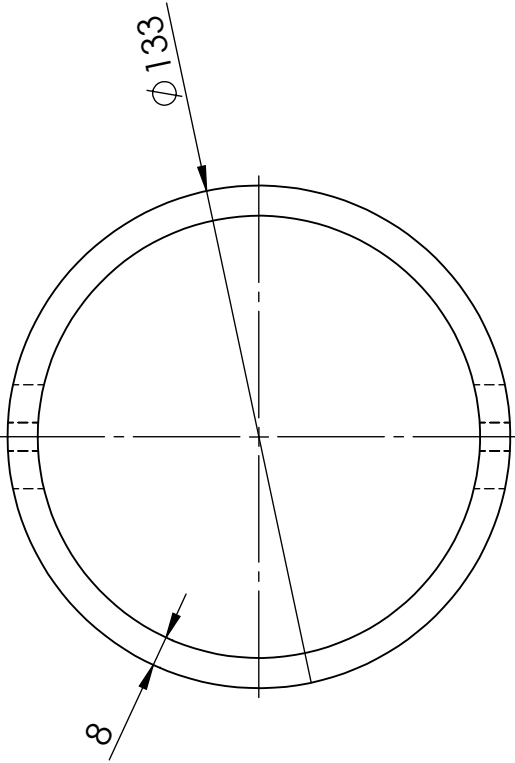
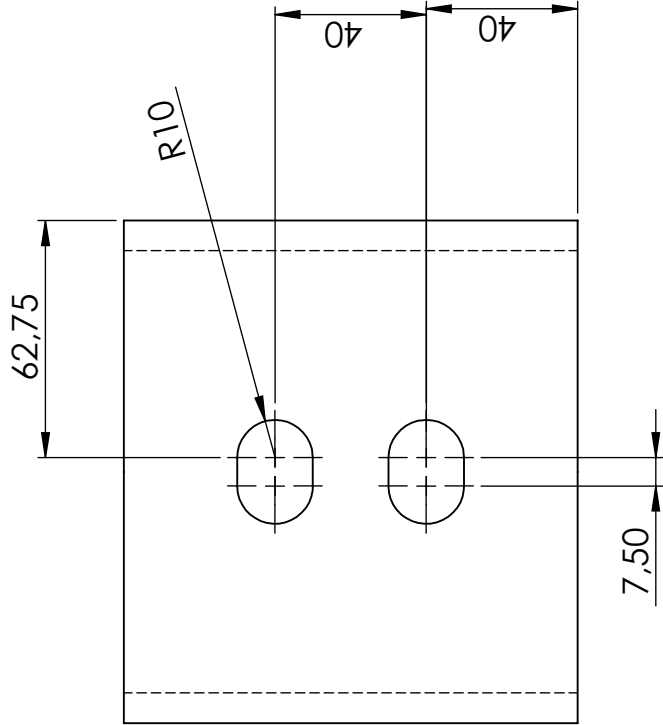
Para sujetar los cables al anclaje se emplea el perno (2) DIN 7990 de M24 y 95mm de longitud, fijado mediante tuerca DIN 24034 de M24



| | | | | | |
|---|-----------------------|--|---------|----------------|---------|
|  | | Si no se indica lo contrario las cotas se expresan en mm | TÍTULO: | PERNOS | |
| DIBUJ. | NOMBRE | | | | |
| VERIF. | Carlos Real Gutiérrez | MATERIAL: | | N.º DE DIBUJO: | Plano 3 |
| APROB. | Laura Castañón Jano | ACABADO: | | | A4 |
| Elena Blanco Fernández/Daniel Castro Fresno | | Rebarbar y romper aristas vivas. | ESCALA: | 27/09/2018 | |




PIEZA 2



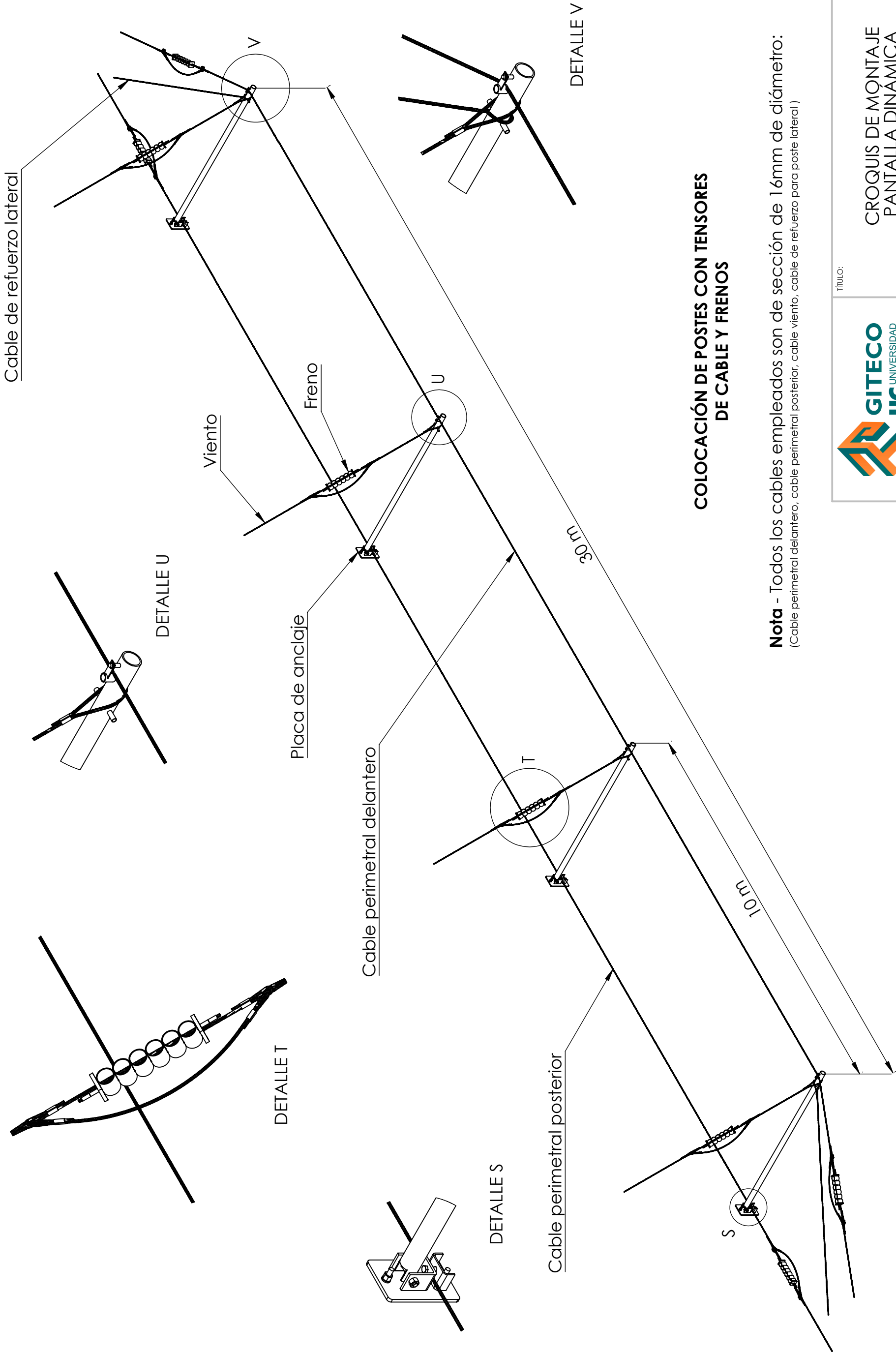
PIEZA 1

Nota - Una vez eliminadas las imperfecciones de las piezas, se le dará una imprimación de epoxi poliamida, una capa intermedia y el acabado con esmalte epoxi.

| | | | | | |
|---|---|--|--------------|------------------------|--|
|  | | Si no se indica lo contrario las cotas se expresan en mm | | TÍTULO: FRENO | |
| | | MATERIAL: Cilindros (Pieza 1) ST52 Chapas (Pieza 2) S235 | | | |
| | | ACABADO: Rebarbar y romper aristas vivas Ver nota referente a pintura | | N.º DE DIBUJO: Plano 4 | |
| DIBUJ. | NOMBRE Carlos Real Gutiérrez | | | | |
| VERIF. | Laura Castañón Jano | | | | |
| APROB. | Elena Blanco Fernández/Daniel Castro Fresno | | ESCALA: 1/20 | FECHA: 27/09/2018 | |



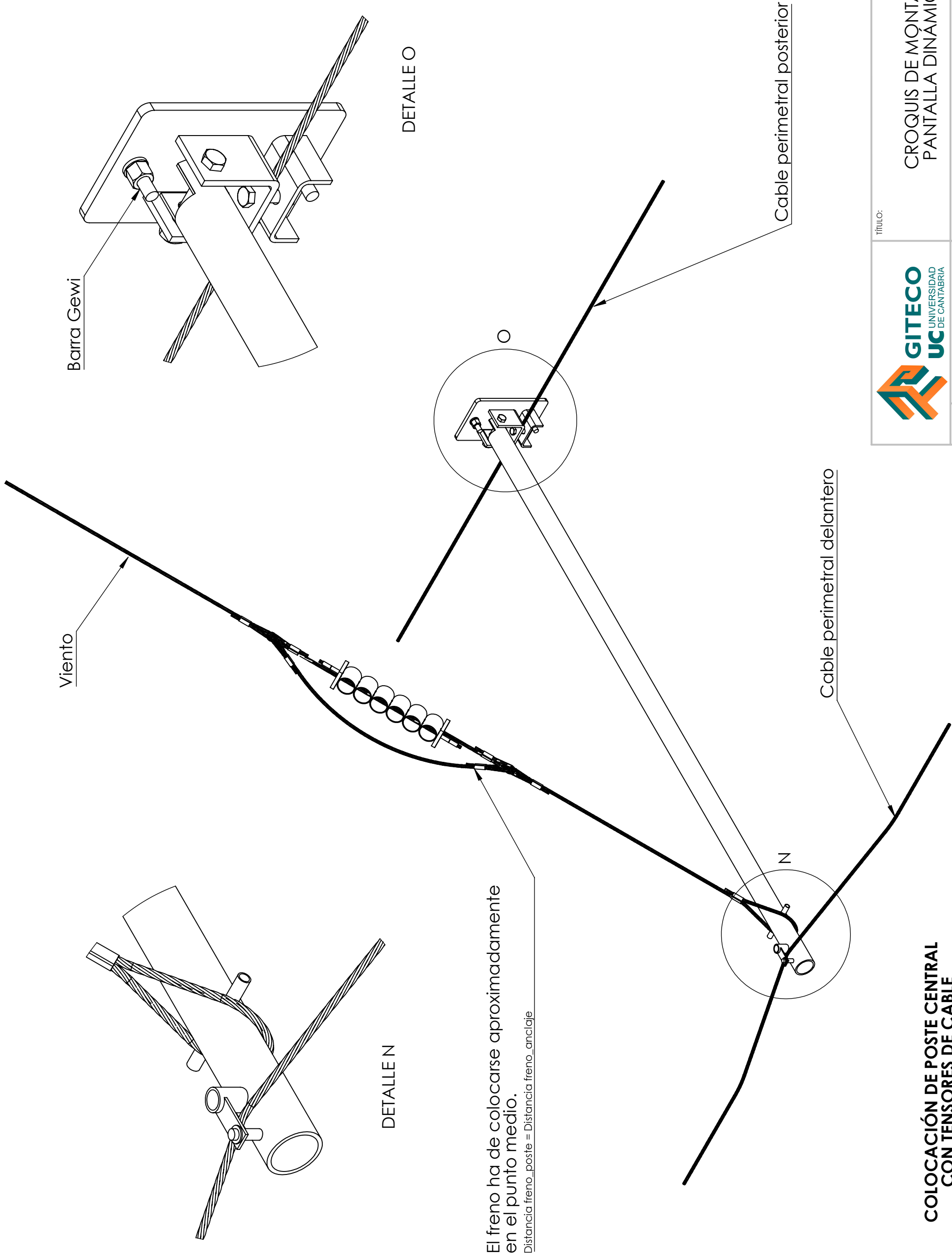
CROQUIS DE MONTAJE **PANTALLA DINÁMICA** (250kj)




COLOCACIÓN DE POSTES CON TENSORES
DE CABLE Y FRENOS

Nota - Todos los cables empleados son de sección de 16mm de diámetro:
(Cable perimetral delantero, cable perimetral posterior, cable viento, cable de refuerzo para poste lateral)

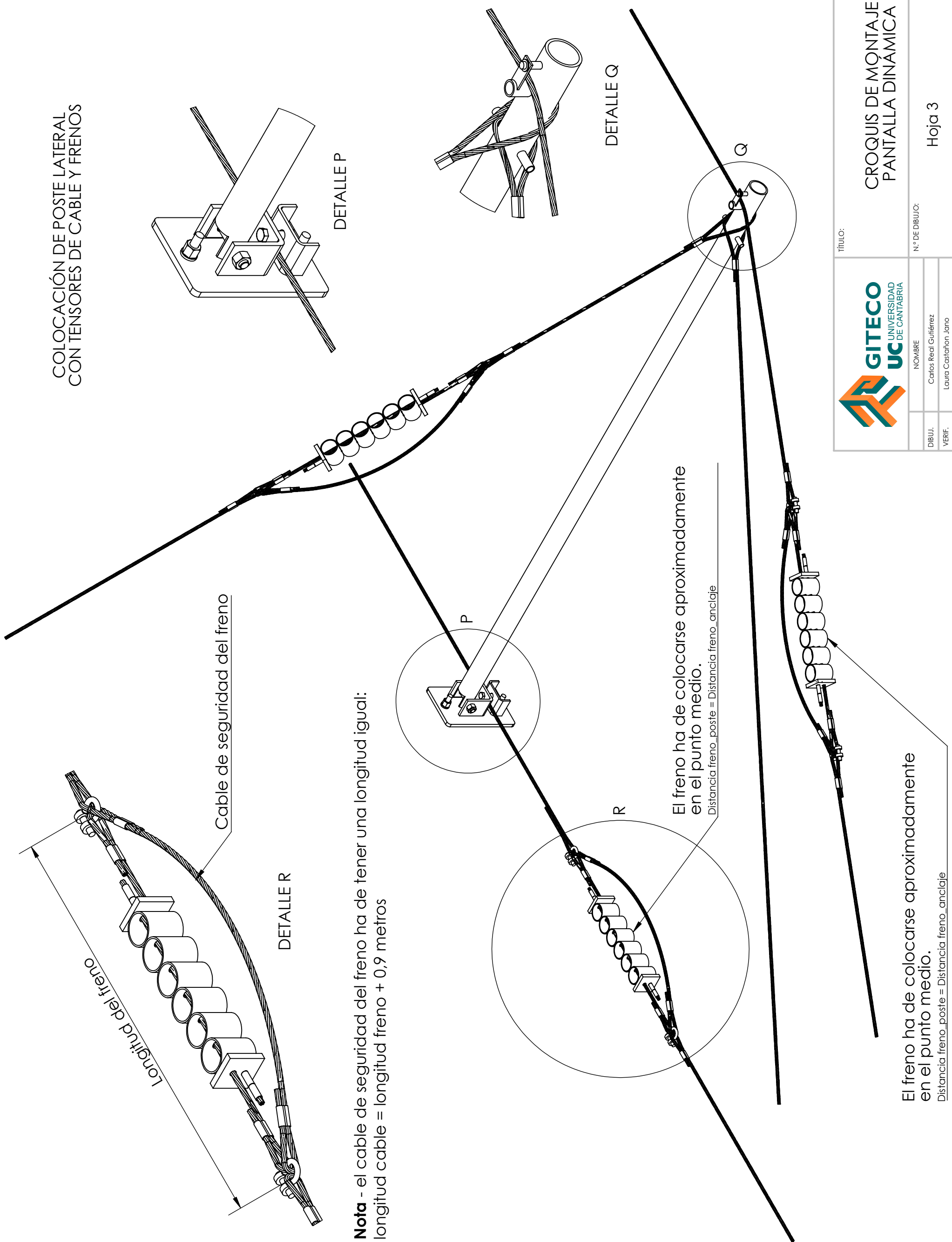
| | | | |
|---|-----------------------|--|----|
| GITECO UNIVERSIDAD DE CANTABRIA | | TÍTULO: CROQUIS DE MONTAJE PANTALLA DINAMICA | |
| DIBUJ. | NOMBRE | Nº DE DIBUJO: | A4 |
| VERIF. | Carlos Real Gutiérrez | Hoja 1 | |
| APROB. | Laura Castañón Jara | FECHA: | |
| Elena Blanco Fernández / Daniel Castro Fresno | | 27/09/2018 | |




| | | | | | |
|--|---|----------------|---------|---|------------|
|  | | TÍTULO: | | CROQUIS DE MONTAJE PANTALLA DINÁMICA | |
| | | N.º DE DIBUJO: | | Hoja 2 | |
| | | | | A4 | |
| DIBUJ. | NOMBRE | | | | |
| VERIF. | Carlos Real Gutiérrez | | | | |
| | Laura Castañón Jara | | | | |
| APROB. | Elena Blanco Fernández / Daniel Castro Fresneda | | ESCALA: | | 27/09/2018 |

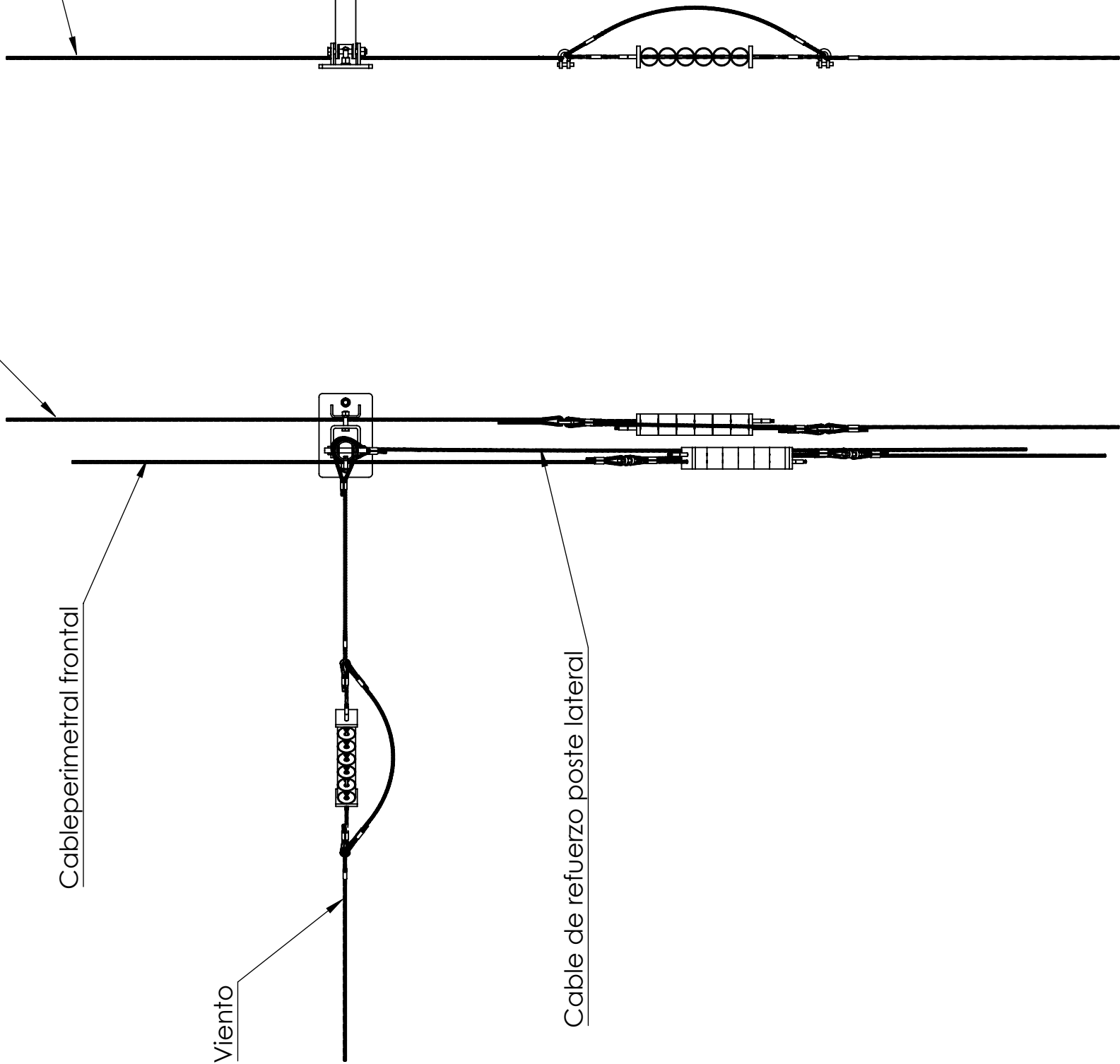
COLOCACIÓN DE POSTE CENTRAL
CON TENSORES DE CABLE

COLOCACIÓN DE POSTE LATERAL
CON TENSORES DE CABLE Y FRENOS



| | | | | | | | |
|--|-----------------------|----------------|---------|---|--|--------|----|
|  | | TÍTULO: | | CROQUIS DE MONTAJE PANTALLA DINAMICA | | | |
| | | N.º DE DIBUJO: | | | | Hoja 3 | A4 |
| DIBUJ. | NOMBRE | | | | | | |
| VERIF. | Carlos Real Gutiérrez | | | | | | |
| APROB. | Laura Castañón Jano | | | | | | |
| Elena Blanco Fernández / Daniel Castro Fresno | | | ESCALA: | FECHA: 27/09/2018 | | | |

Cable perimetral posterior



Cable perimetral posterior

Cable perimetral frontal

Viento

Cable de refuerzo poste lateral

VISTAS POSTE LATERAL
CON TENSORES DE CABLE Y FRENOS
(PARA VISIONADO DE LA ORIENTACIÓN DE LOS CABLES)



TÍTULO:

CROQUIS DE MONTAJE
PANTALLA DINÁMICA

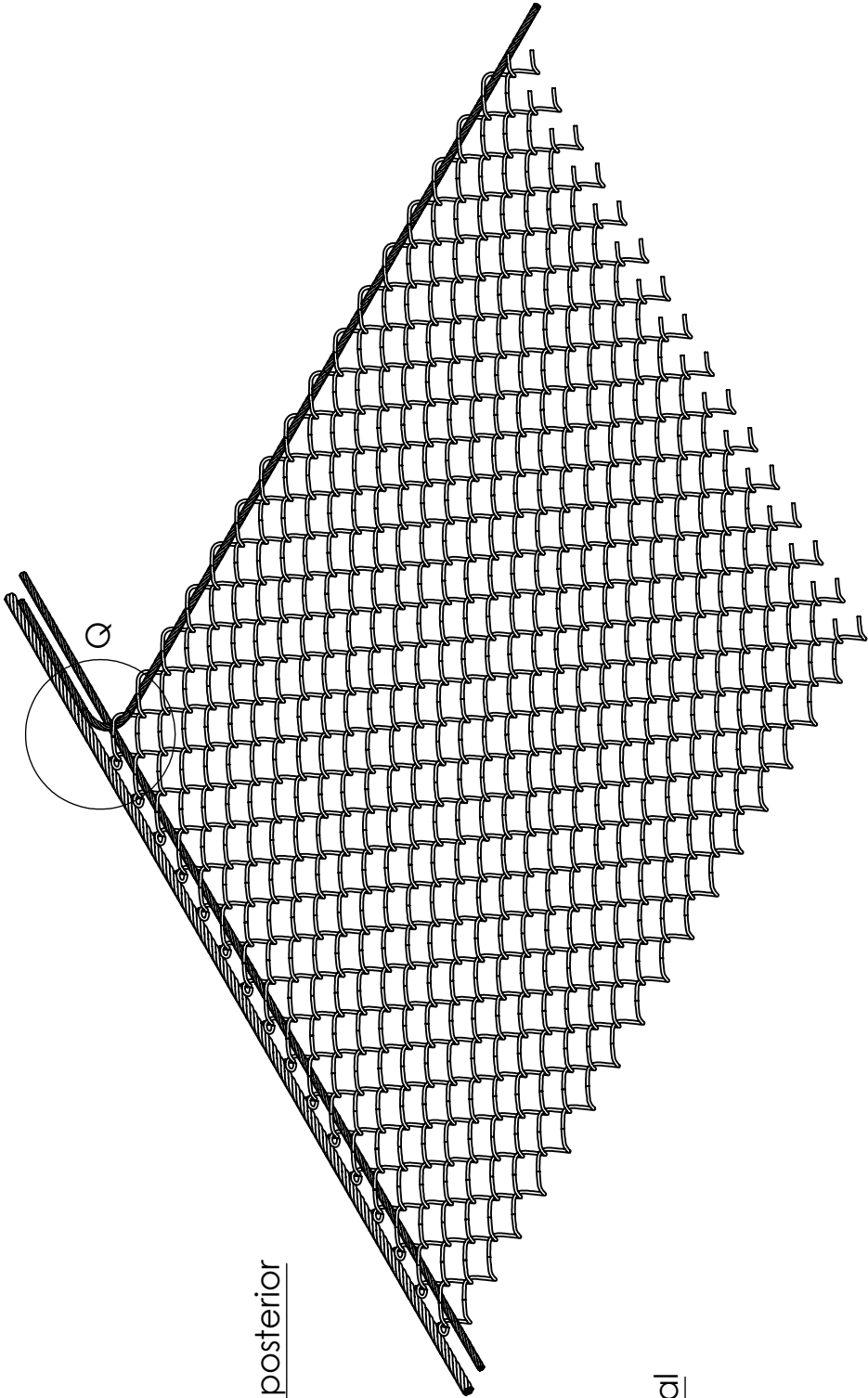
| | | | |
|---|-----------------------|--------|------------|
| N.º DE DIBUJO: | | Hoja 4 | A4 |
| DIBUJ. | NOMBRE | | |
| VERIF. | Carlos Real Gutiérrez | | |
| APROB. | Laura Castañón Jaro | | |
| Elena Blanco Fernández / Daniel Castro Fresco | | FECHA: | 27/09/2018 |

Cable perimetral posterior

Cable premontado posterior

Cable premontado lateral

DETALLE Q



30 m

Cable premontado posterior

Cable premontado lateral

4 m

Cable premontado lateral

Cable premontado frontal

Zona representada

CABLES PREMONTADOS EN LA RED
MT15000

Nota - Los paños de la red MT15000 serán de 30m x 4 m, en cada uno de sus cuatro lados irán premontados cables de diámetro 10mm



TÍTULO:

CROQUIS DE MONTAJE
PANTALLA DINÁMICA

DIBUJ.

NOMBRE

Carlos Real Gutiérrez

VERIF.

Laura Castañón Jara

APROB.

Elena Blanco Fernández/Daniel Castro Fresno

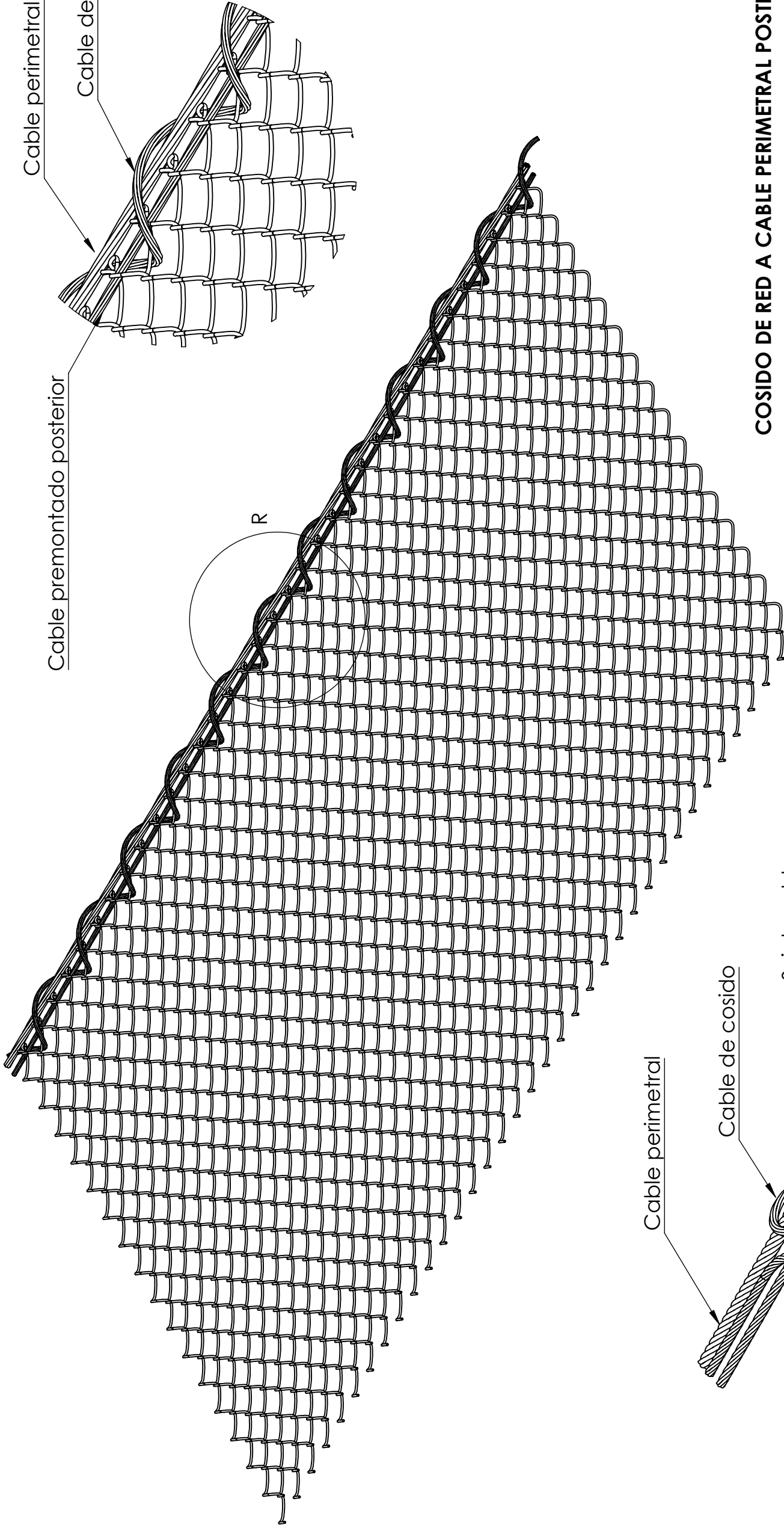
ESCALA:

FECHA:

27/09/2018

Hoja 5

A4



Cable premontado posterior

Cable de cosido

DETALLE R
ESCALA 1 : 5

COSIDO DE RED A CABLE PERIMETRAL POSTERIOR

Cable perimetral

Cable de cosido

Sujetacables

Nota - La unión entre la red MT15000 y el cable perimetral posterior se realiza mediante un cable de cosido de 10mm de diámetro.

El cable de cosido avanza en espiral entrelazando el cable premontado posterior con el cable perimetral posterior cada tres espiras de la malla MT15000

Nota - En los extremos el cable de cosido se curva y se anuda sobre si mismo mediante dos sujetacables

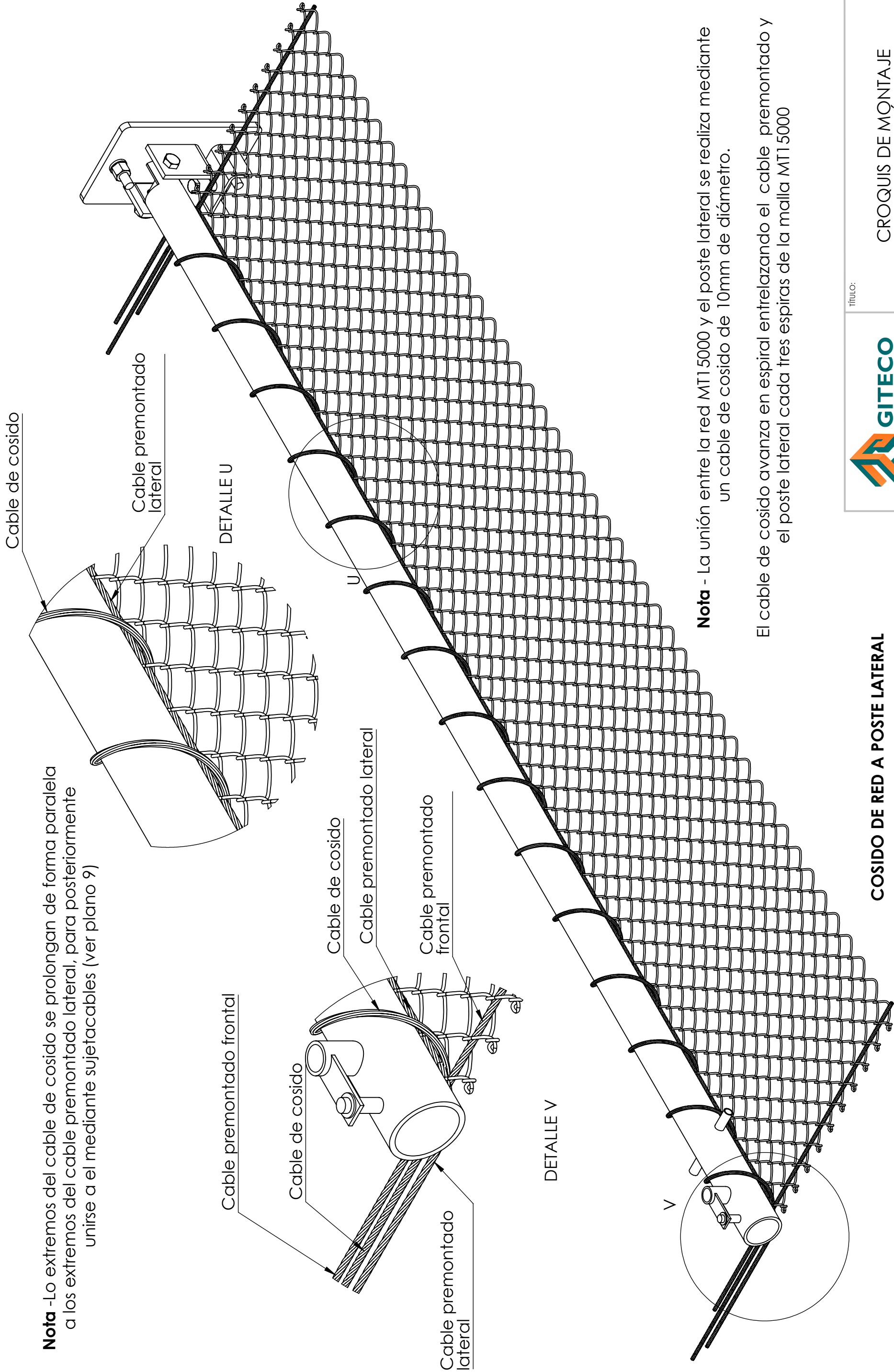


TÍTULO:

CROQUIS DE MONTAJE
PANTALLA DINAMICA

| | | | |
|---------------|---|-------------------|----|
| Nº DE DIBUJO: | | Hoja 6 | A4 |
| | NOMBRE | | |
| DIBUJ. | Carlos Real Gutiérrez | | |
| VERIF. | Laura Castañón Jara | | |
| APROB. | Elena Blanco Fernández/Daniel Castro Fresno | | |
| ESCALA: | | FECHA: 27/09/2018 | |

Nota -Lo extremos del cable de cosido se prolongan de forma paralela a los extremos del cable premontado lateral, para posteriormente unirse a el mediante sujetacables (ver plano 9)



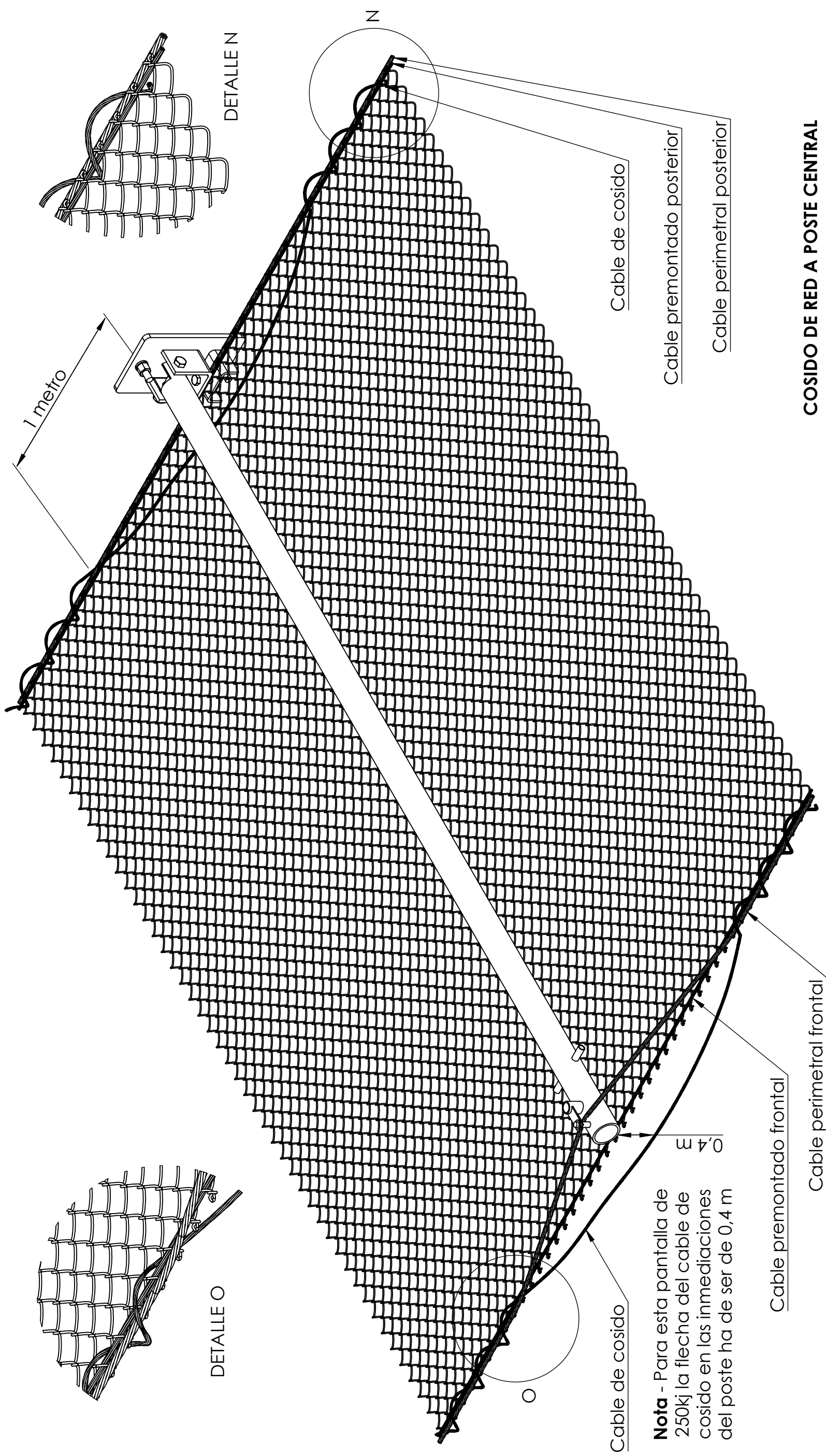
Nota - La unión entre la red MT15000 y el poste lateral se realiza mediante un cable de cosido de 10mm de diámetro.

El cable de cosido avanza en espiral entrelazando el cable premontado y el poste lateral cada tres espiras de la malla MT15000

COSIDO DE RED A POSTE LATERAL

| | | | |
|--------|---|--|------------|
| | | TÍTULO: CROQUIS DE MONTAJE PANTALLA DINAMICA | |
| DIBUJ. | NOMBRE | Nº DE DIBUJO: | A4 |
| VERIF. | Carlos Real Gutiérrez | | |
| APROB. | Laura Castañón Jano | Hoja 7 | |
| | Elena Blanco Fernández/Daniel Castro Fresno | FECHA: | 27/09/2018 |

Nota -Lo vientos y los cable perimetrales no están representados




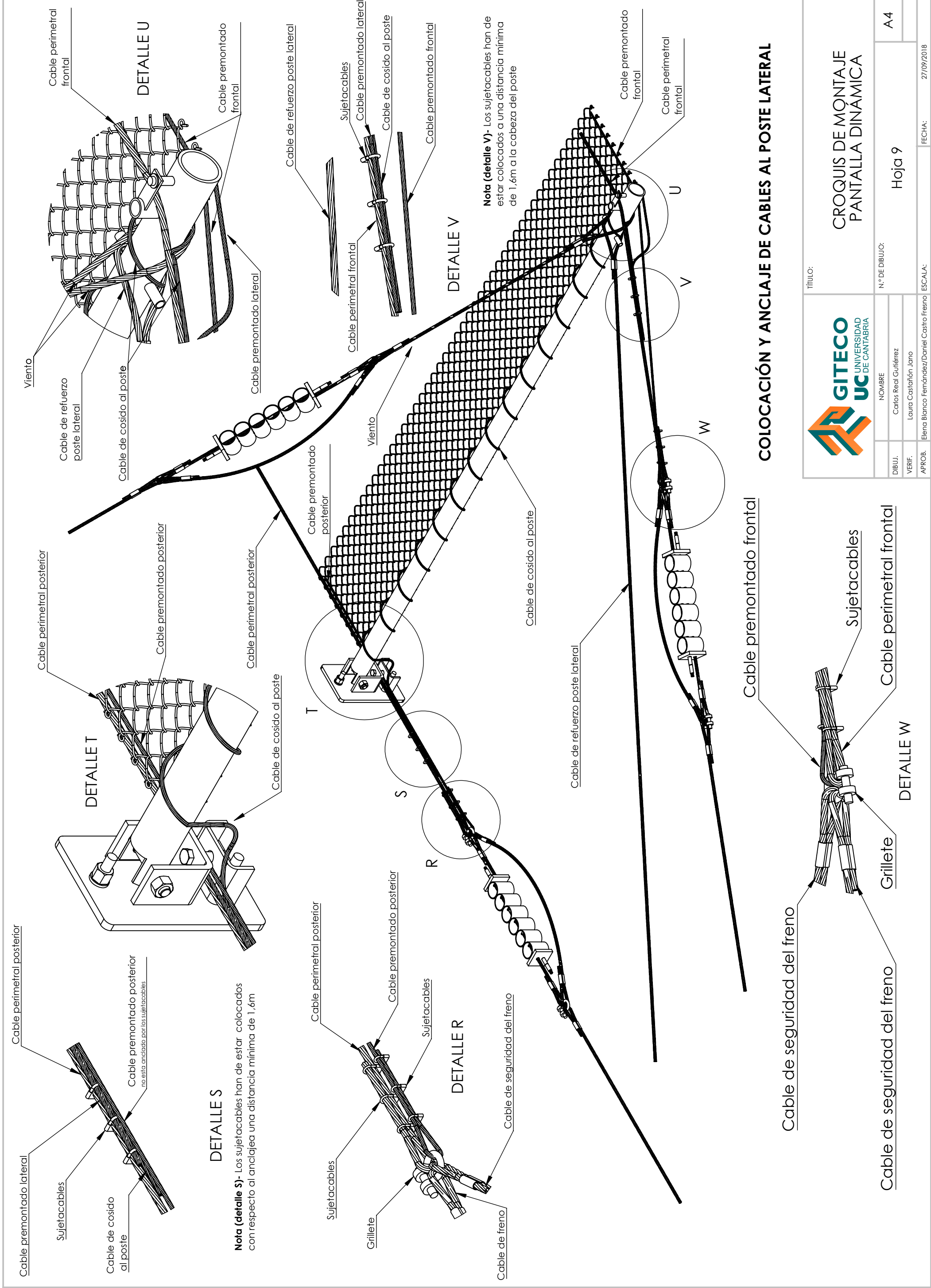
COSIDO DE RED A POSTE CENTRAL

Nota - La unión entre la red MT1 5000 y los postes centrales se realiza mediante un cable de cosido de 10mm de diámetro.

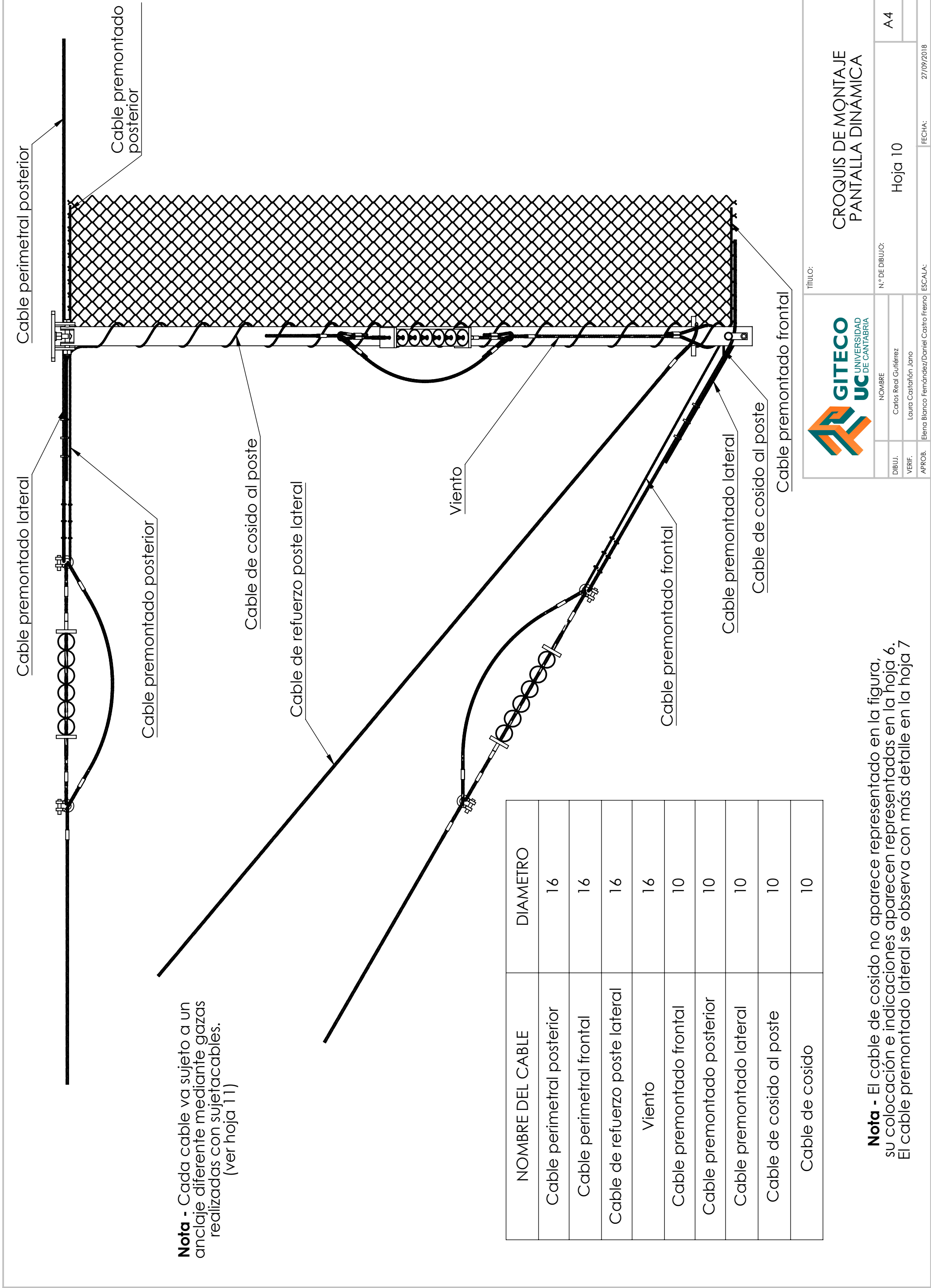
En la parte frontal el cable de cosido avanza en espiral entrelazando el cable premontado de la MT 15000 y el cable perimetral frontal cada 3 espiras de la malla, con la particularidad de que a un metro a cada lado del poste, el cable de cosido interrumpe la espiral para quedar combado.

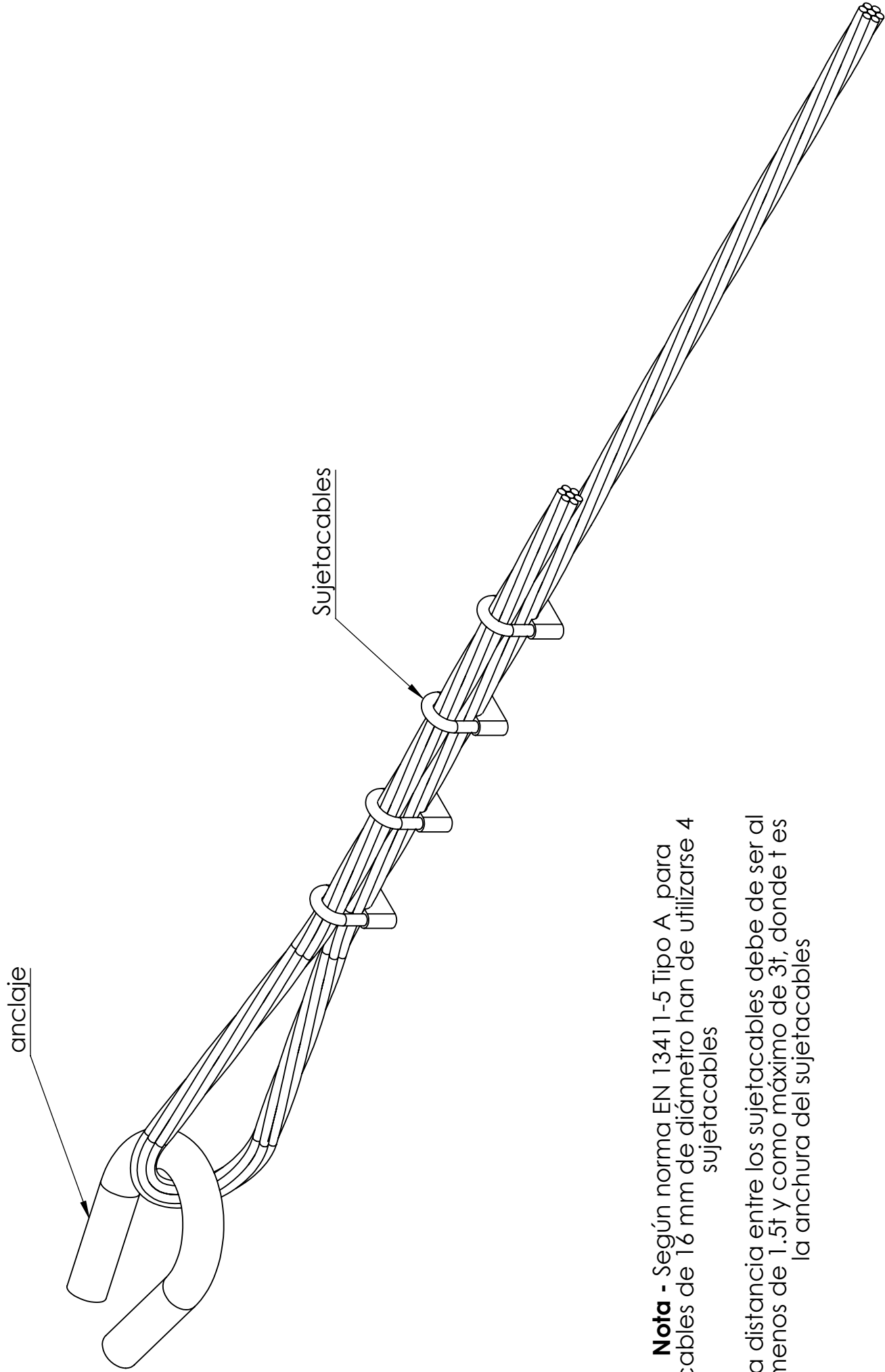
La unión en la parte posterior se realiza de forma análoga

| | | | | | | |
|--|-----------------------|---------|----------------|---|--|--|
|  | | TÍTULO: | | CROQUIS DE MONTAJE PANTALLA DINAMICA | | |
| DIBUJ. VERIF. APROB. | NOMBRE | | N.º DE DIBUJO: | | | |
| | Carlos Real Cullérrez | | Hoja 8 | | | |
| | Laura Castañón Jano | | | | | |
| Elena Blanco Fernández/Daniel Castro Fresno | | ESCALA: | | FECHA: 27/09/2018 | | |
| | | | | A4 | | |




| | | | |
|--------|---|--|------------|
| | | TÍTULO: CROQUIS DE MONTAJE PANTALLA DINAMICA | |
| DIBUJ. | NOMBRE | Nº DE DIBUJO: | Hoja 9 |
| VERIF. | Carlos Real Gutiérrez | | |
| APROB. | Laura Castañón Jano | | |
| | Elena Blanco Fernández/Daniel Castro Fresno | ESCALA: | 27/09/2018 |





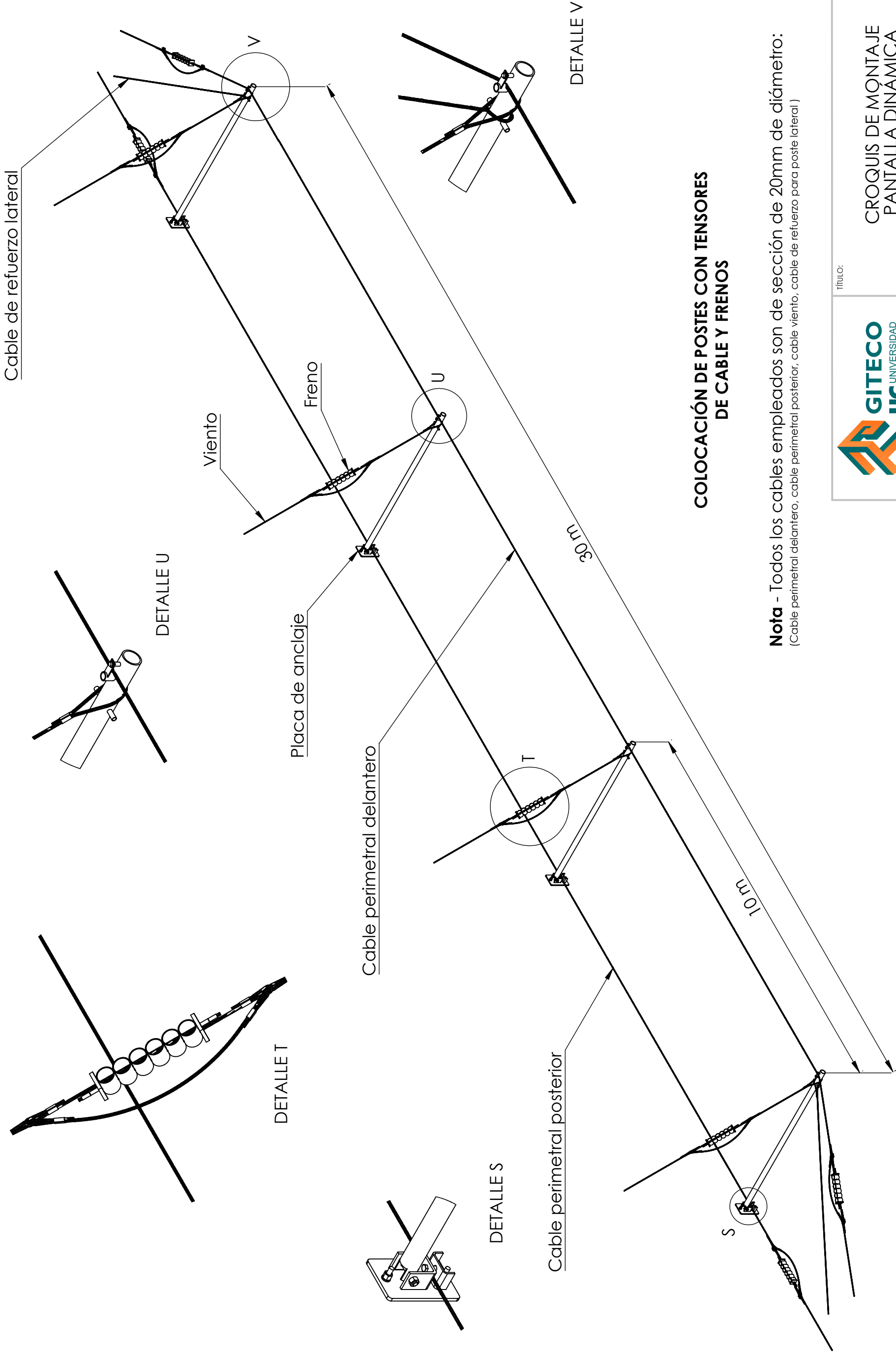
Nota - Según norma EN 13411-5 Tipo A, para cables de 16 mm de diámetro han de utilizarse 4 sujetacables

La distancia entre los sujetacables debe de ser al menos de 1.5t y como máximo de 3t, donde t es la anchura del sujetacables

| | | | | | | | |
|--|--|---|--|---|--|-------------------|--|
|  | | TÍTULO: | | CROQUIS DE MONTAJE PANTALLA DINÁMICA | | A4 | |
| | | NOMBRE | | N.º DE DIBUJO: | | Hoja 11 | |
| DIBUJ. | | Carlos Real Gutiérrez | | | | | |
| VERIF. | | Laura Castañón Jaro | | | | | |
| APROB. | | Elena Blanco Fernández/Daniel Castro Fresno | | ESCALA: | | FECHA: 27/09/2018 | |



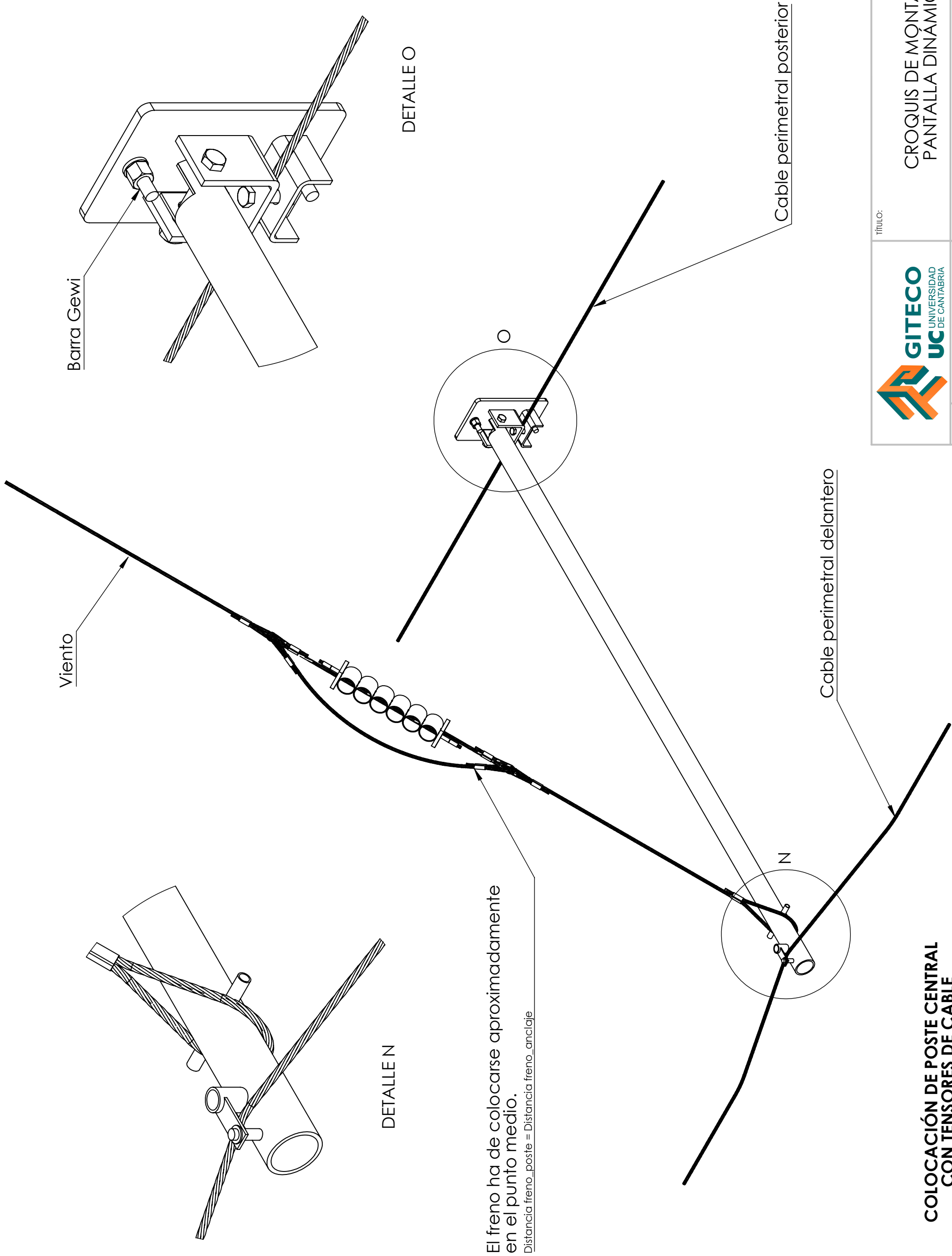
CROQUIS DE MONTAJE **PANTALLA DINÁMICA** (500kj)




COLOCACIÓN DE POSTES CON TENSORES
DE CABLE Y FRENOS

Nota - Todos los cables empleados son de sección de 20mm de diámetro:
(Cable perimetral delantero, cable perimetral posterior, cable viento, cable de refuerzo para poste lateral)

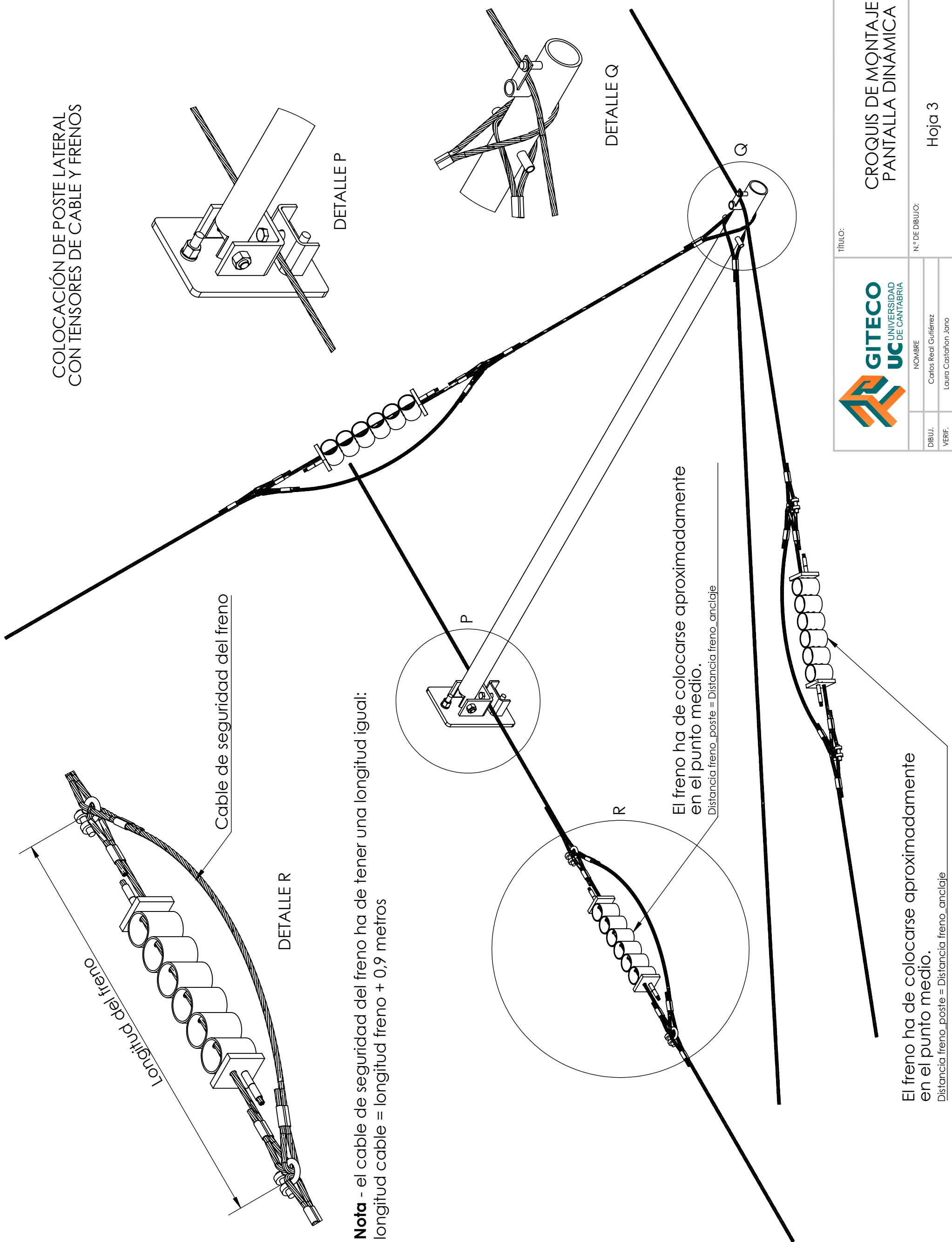
| | | | |
|---|-----------------------|--|------------|
| GITECO UNIVERSIDAD DE CANTABRIA | | TÍTULO: CROQUIS DE MONTAJE PANTALLA DINAMICA | |
| DIBUJ. | NOMBRE | Nº DE DIBUJO: | A4 |
| VERIF. | Carlos Real Gutiérrez | Hoja 1 | |
| APROB. | Laura Castañón Jara | FECHA: | 27/09/2018 |
| Elena Blanco Fernández / Daniel Castro Fresno | | ESCALA: | |



| | | | | | |
|--|--|----------------|--|---|--|
|  | | TÍTULO: | | CROQUIS DE MONTAJE PANTALLA DINÁMICA | |
| | | N.º DE DIBUJO: | | Hoja 2 | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | </ | |

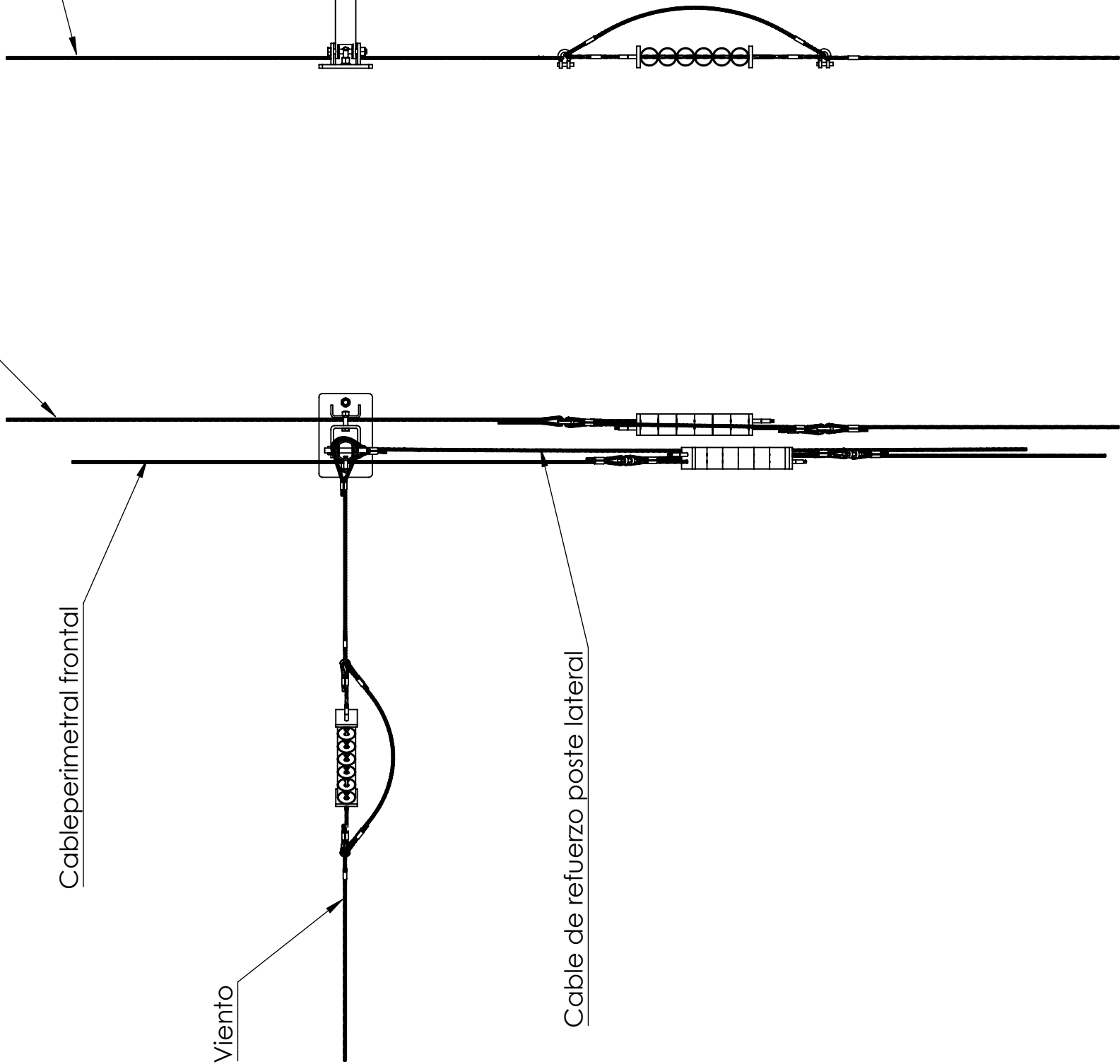
COLOCACIÓN DE POSTE CENTRAL
CON TENSORES DE CABLE

COLOCACIÓN DE POSTE LATERAL
CON TENSORES DE CABLE Y FRENOS



| | | | |
|---|-----------------------|--------------------------------------|------------|
| GITECO | | TÍTULO: | |
| UNIVERSIDAD DE CANTABRIA | | CROQUIS DE MONTAJE PANTALLA DINÁMICA | |
| DIBUJ. | NOMBRE | Nº DE DIBUJO: | A4 |
| VERIF. | Carlos Real Gutiérrez | | |
| APROB. | Laura Castañón Jaro | Hoja 3 | |
| Elena Blanco Fernández / Daniel Castro Fresno | | FECHA: | 27/09/2018 |

Cable perimetral posterior



Cable perimetral posterior

Cable perimetral frontal

Viento

Cable de refuerzo poste lateral

VISTAS POSTE LATERAL
CON TENSORES DE CABLE Y FRENOS
(PARA VISIONADO DE LA ORIENTACIÓN DE LOS CABLES)



TÍTULO:

CROQUIS DE MONTAJE
PANTALLA DINÁMICA

DIBUJ.

VERIF.

APROB.

NOMBRE

Carlos Real Gutiérrez

Laura Castañón Jara

N.º DE DIBUJO:

Hoja 4

A4

ESCALA:

FECHA:

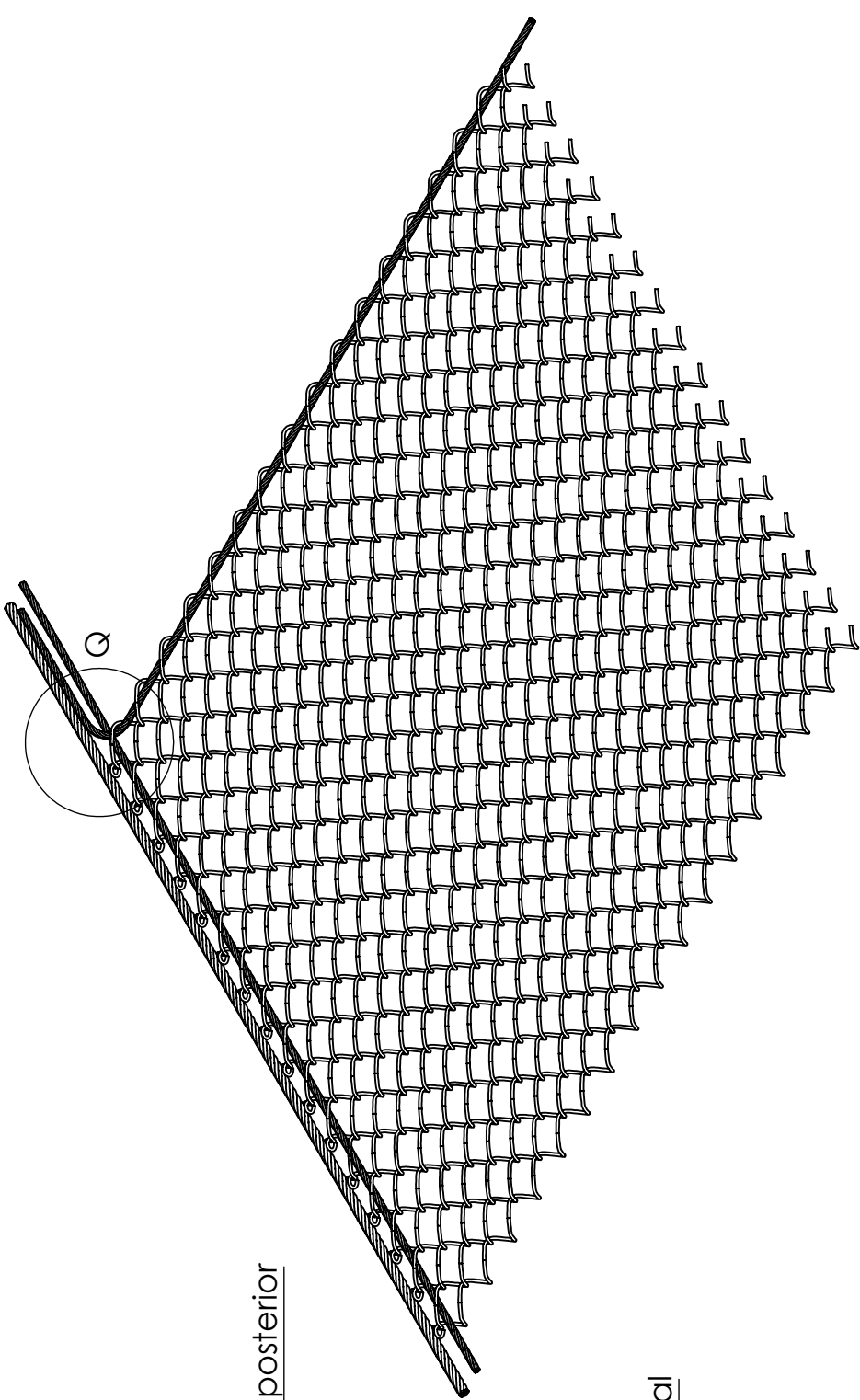
27/09/2018

Cable perimetral posterior

Cable premontado posterior

Cable premontado lateral

DETALLE Q



30 m

Cable premontado posterior

Cable premontado lateral

4 m

Cable premontado lateral

Cable premontado frontal

Zona representada

CABLES PREMONTADOS EN LA RED
MT15000

Nota - Los paños de la red MT15000 serán de 30m x 4 m, en cada uno de sus cuatro lados irán premontados cables de diámetro 10mm



TÍTULO:

CROQUIS DE MONTAJE
PANTALLA DINÁMICA

DIBUJ.

Carlos Real Gutiérrez

VERIF.

Laura Castañón Jara

APROB.

Elena Blanco Fernández/Daniel Castro Fresno

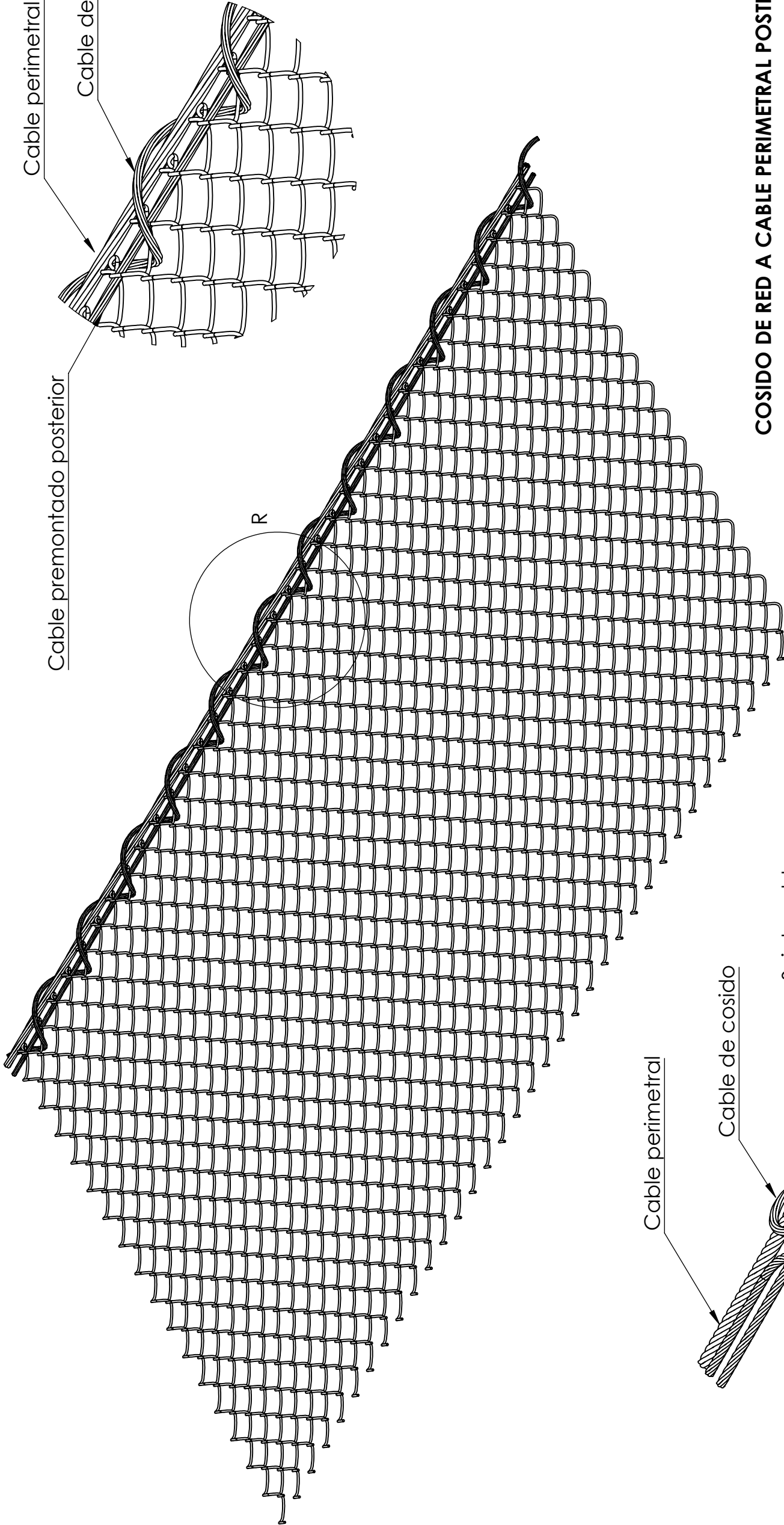
N.º DE DIBUJO:

Hoja 5

A4

ESCALA:

27/09/2018



Cable premontado posterior

Cable de cosido

DETALLE R
ESCALA 1 : 5

COSIDO DE RED A CABLE PERIMETRAL POSTERIOR

Cable perimetral

Cable de cosido

Sujetacables

Nota - La unión entre la red MT15000 y el cable perimetral posterior se realiza mediante un cable de cosido de 10mm de diámetro.

El cable de cosido avanza en espiral entrelazando el cable premontado posterior con el cable perimetral posterior cada tres espiras de la malla MT15000

Nota - En los extremos el cable de cosido se curva y se anuda sobre si mismo mediante dos sujetacables

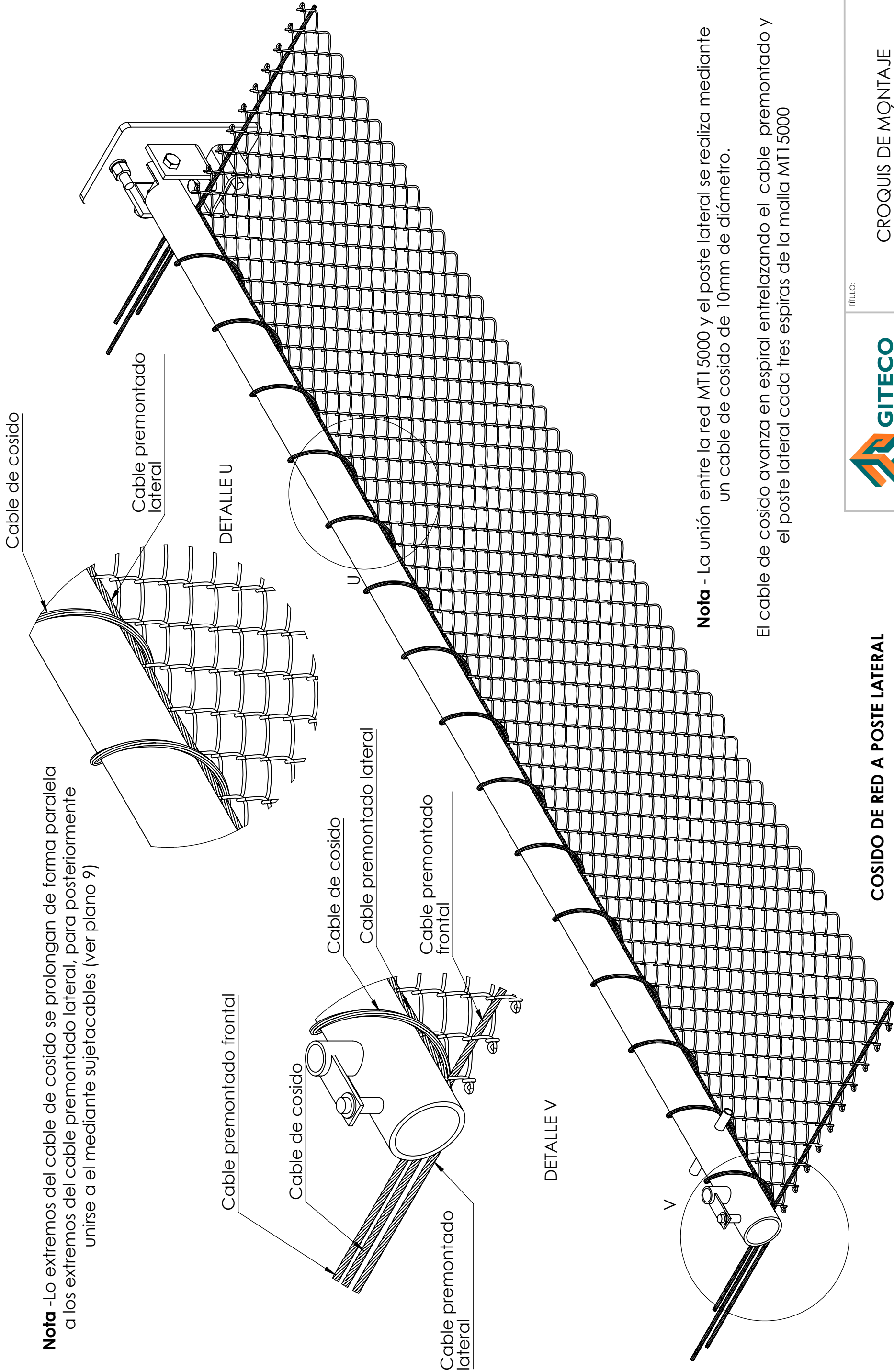


TÍTULO:

CROQUIS DE MONTAJE
PANTALLA DINAMICA

| | | | |
|---------------|---|-------------------|----|
| Nº DE DIBUJO: | | Hoja 6 | A4 |
| | NOMBRE | | |
| DIBUJ. | Carlos Real Gutiérrez | | |
| VERIF. | Laura Castañón Jara | | |
| APROB. | Elena Blanco Fernández/Daniel Castro Fresno | | |
| ESCALA: | | FECHA: 27/09/2018 | |

Nota -Lo extremos del cable de cosido se prolongan de forma paralela a los extremos del cable premontado lateral, para posteriormente unirse a el mediante sujetacables (ver plano 9)



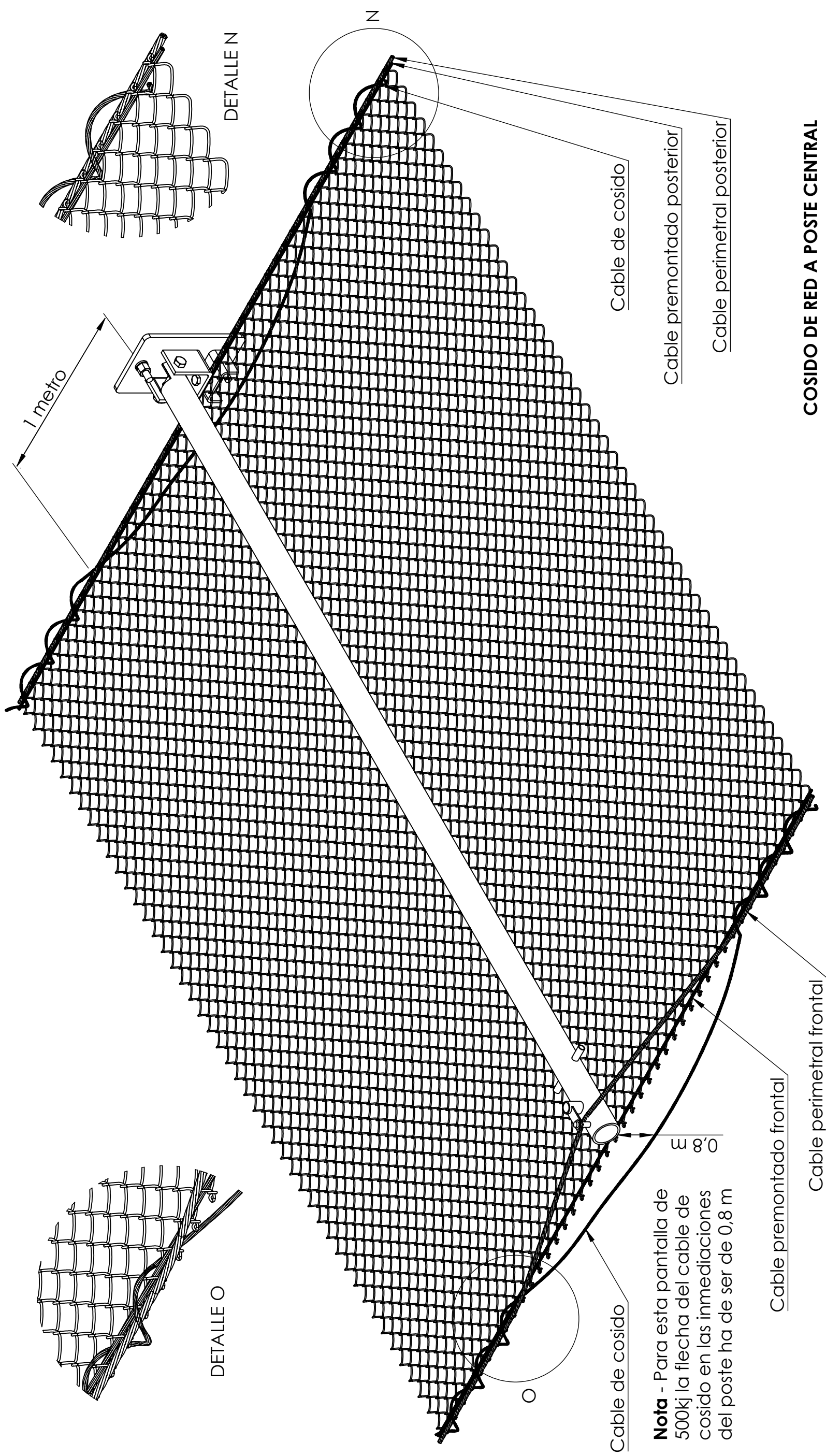
Nota - La unión entre la red MT15000 y el poste lateral se realiza mediante un cable de cosido de 10mm de diámetro.

El cable de cosido avanza en espiral entrelazando el cable premontado y el poste lateral cada tres espiras de la malla MT15000

COSIDO DE RED A POSTE LATERAL

| | | | |
|--------|---|--|------------|
| | | TÍTULO: CROQUIS DE MONTAJE PANTALLA DINAMICA | |
| DIBUJ. | NOMBRE | Nº DE DIBUJO: | A4 |
| VERIF. | Carlos Real Gutiérrez | | |
| APROB. | Laura Castañón Jano | Hoja 7 | |
| | Elena Blanco Fernández/Daniel Castro Fresno | FECHA: | 27/09/2018 |

Nota -Lo vientos y los cable perimetrales no están representados




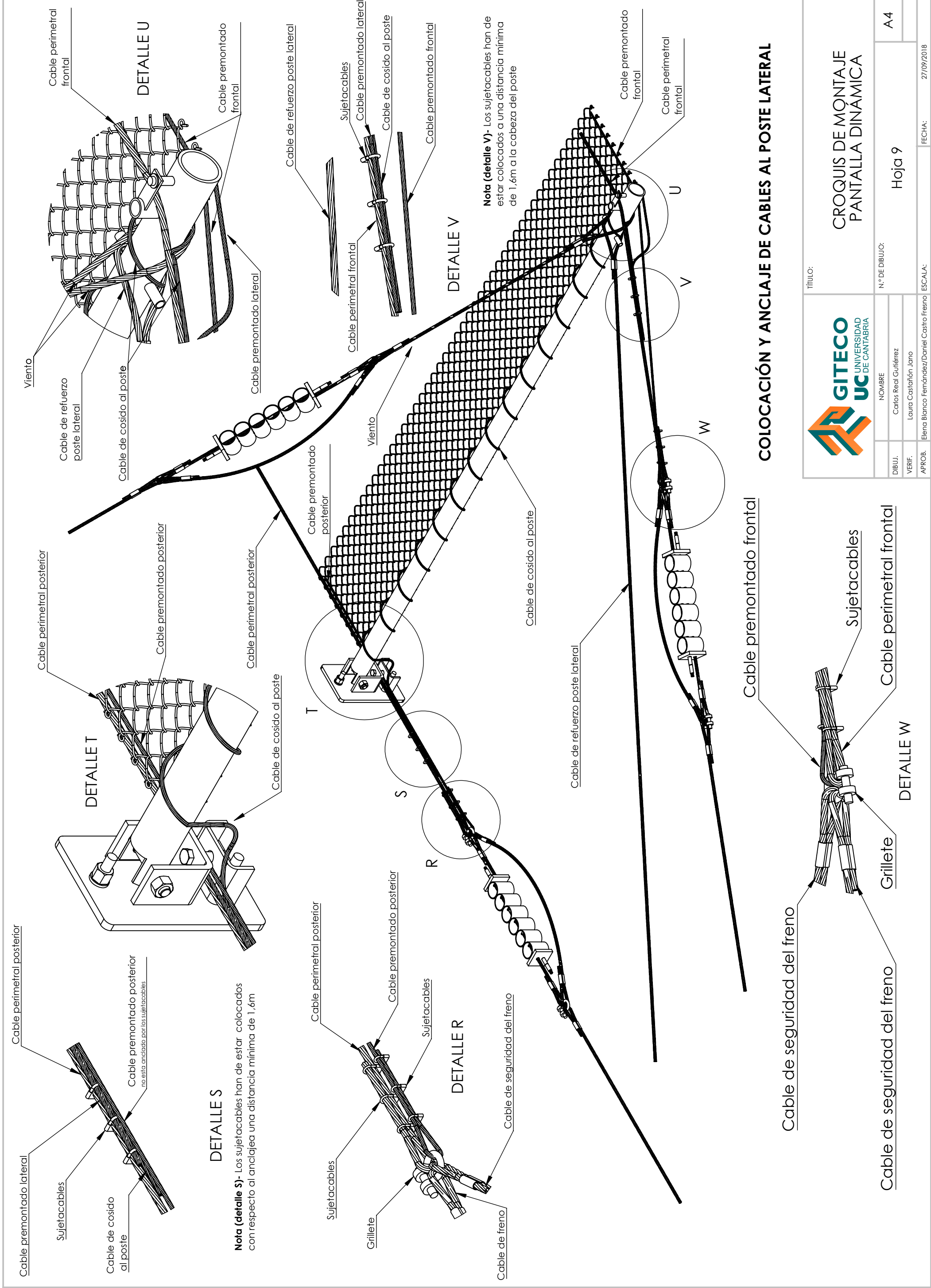
COSIDO DE RED A POSTE CENTRAL

Nota - La unión entre la red MT1 5000 y los postes centrales se realiza mediante un cable de cosido de 10mm de diámetro.

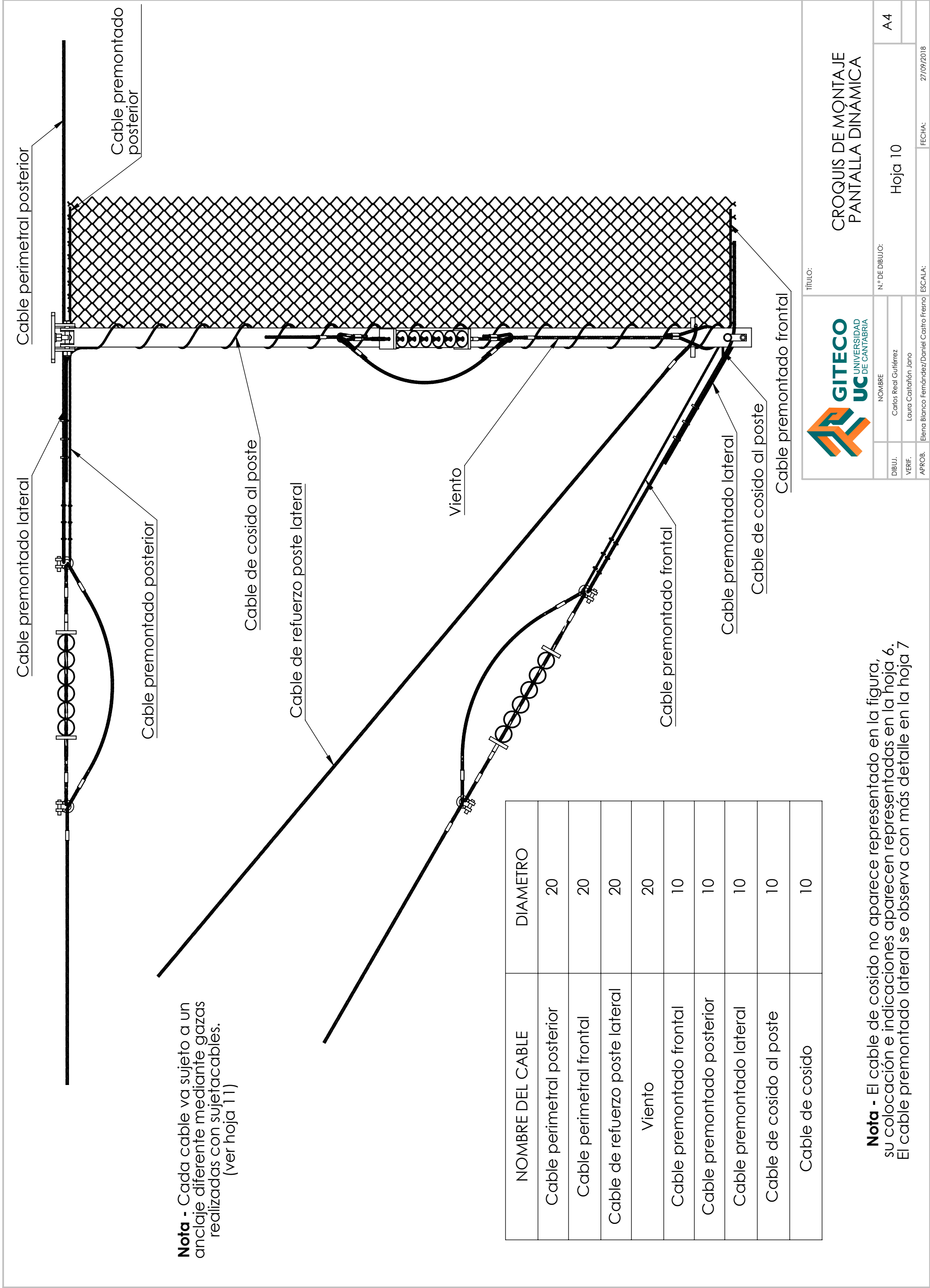
En la parte frontal el cable de cosido avanza en espiral entrelazando el cable premontado de la MT 15000 y el cable perimetral frontal cada 3 espiras de la malla, con la particularidad de que a un metro a cada lado del poste, el cable de cosido interrumpe la espiral para quedar combado.

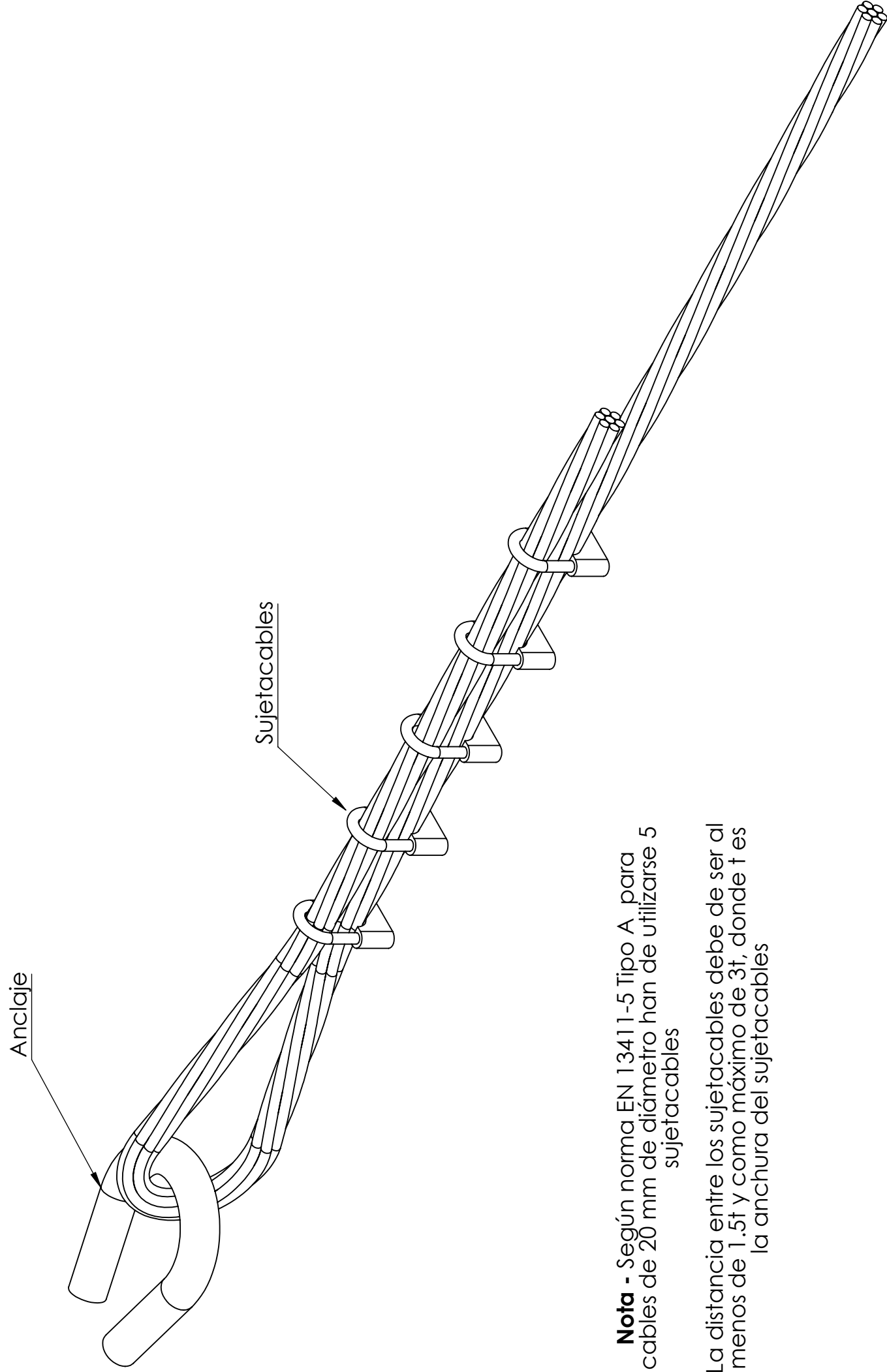
La unión en la parte posterior se realiza de forma análoga

| | | | | | |
|--|--------|---------|----------------|---|--------|
|  | | TÍTULO: | | CROQUIS DE MONTAJE PANTALLA DINAMICA | |
| DIBUJ. | VERIF. | APROB. | N.º DE DIBUJO: | | Hoja 8 |
| | | | A4 | | |
| | | | FECHA: | | |
| | | | 27/09/2018 | | |




| | | | |
|---|-----------------------|---------------|--|
| | | TÍTULO: | |
| CROQUIS DE MONTAJE PANTALLA DINAMICA | | Nº DE DIBUJO: | |
| | | Hoja 9 | |
| | | A4 | |
| DIBUJ. | NOMBRE | | |
| VERIF. | Carlos Real Gutiérrez | | |
| APROB. | Laura Castañón Jano | | |
| Elena Blanco Fernández/Daniel Castro Fresno | | FECHA: | |
| | | 27/09/2018 | |





Nota - Según norma EN 13411-5 Tipo A, para cables de 20 mm de diámetro han de utilizarse 5 sujetacables

La distancia entre los sujetacables debe de ser al menos de 1.5t y como máximo de 3t, donde t es la anchura del sujetacables

| | | | | | | | |
|--|--|---|--|---|--|-------------------|--|
|  | | TÍTULO: | | CROQUIS DE MONTAJE PANTALLA DINAMICA | | A4 | |
| | | NOMBRE | | N.º DE DIBUJO: | | Hoja 11 | |
| DIBUJ. | | Carlos Real Gutiérrez | | | | | |
| VERIF. | | Laura Castañón Jaro | | | | | |
| APROB. | | Elena Blanco Fernández/Daniel Castro Fresno | | ESCALA: | | FECHA: 27/09/2018 | |